

# **Influência do teor de água no comportamento de materiais de construção**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de  
Construção

**Simão Cabanita de Azevedo**

**Orientador:** Prof. Doutor Fernando M. A. Henriques

Monte de Caparica, Janeiro 2011



# **Agradecimentos**

Agradeço ao Professor Fernando M.A. Henriques, orientador desta dissertação, pelo espírito crítico, orientação e apoio científico.

À Engenheira Ana Brás, pela disponibilidade e acompanhamento prestado no desenvolvimento experimental.

Ao Engenheiro Alberto Barata, ao responsável comercial António Caldeira, à empresa VIROC, à empresa Knauf Insulation, à empresa Weber, por fornecerem materiais de construção e por terem a disponibilidade de dar algumas explicações que tornaram este trabalho possível.

À minha família e amigos pelo seu apoio incondicional, ajuda, paciência e encorajamento durante a realização desta dissertação.



# Resumo

A presente dissertação tem como objecto o estudo da influência do teor de água nos materiais de construção, sendo o mesmo definido como o peso da água contido numa determinada amostra expresso em percentagem. O interesse deste estudo decorre da crescente importância sobre o conhecimento do efeito da humidade sobre os diversos tipos de materiais de construção utilizados actualmente.

Incidu-se na análise da adsorção higroscópica isotérmica, cujo objectivo é obter para uma determinada temperatura constante os valores de equilíbrio do teor de água em diversos níveis de humidade relativa. Para tal, realizou-se uma análise em dois processos: adsorção (aumento da humidade relativa) e desadsorção (diminuição da humidade relativa). Verificando também a ocorrência ou não do efeito de histerese.

Para além da análise da adsorção isotérmica, este estudo incidiu ainda na influência que o teor de água promove na variação dos valores de condutibilidade térmica referentes aos materiais de construção em questão, e na forma como esta variação influencia o comportamento térmico de uma parede.

Foi ainda realizado um exame comparativo dos dados experimentais com outros do programa informático WUFI e da bibliografia.

**Palavras-chave:** Adsorção isotérmica; materiais de construção; histerese; condutibilidade térmica.

# Abstract

This dissertation has as main objective the study of the influence of water content in building materials, defined as the weight of water contained in a determined sample expressed in percentage. The assessment of the moisture behavior of building materials is nowadays of increasing importance.

The aim of the present study was analyzing the hygroscopic adsorption isotherm, whose goal is to obtain for a constant temperature, by means of a specified laboratory procedure, the values of the equilibrium moisture content at various levels of relative humidity. To this end, it was made an analysis divided into two processes: adsorption (increasing relative humidity) and desorption (decreasing relative humidity). Was also studied the presence of the hysteresis effect in building materials.

In addition to analyzing the adsorption isotherm, this study examined the influence that the water content promotes on the variation of the thermal conductivity, related to building materials and how this variation influences the thermal behavior of a building.

It was also carried a comparative examination of experimental data with data from WUFI software and bibliography.

**Keywords:** Adsorption isotherm; building materials, hysteresis, thermal conductivity

## **Abreviaturas**

Relação A/C – relação água-cimento

HR – Humidade Relativa

U – Coeficiente de transmissão térmica

$\lambda$  – Condutibilidade térmica

R – Resistência térmica

EPS – Poliestireno expandido

XPS – Poliestireno extrudido

## **Siglas**

FCT-UNL – Faculdade de ciências e tecnologia – Universidade Nova de Lisboa

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ASTM - American Society for Testing and Materials

## Índice de texto

1 - Introdução .....	1
1.2 - Objectivo .....	2
2 - Análise do conhecimento .....	3
2.1 Considerações gerais sobre os fenómenos de adsorção e desadsorção .....	3
2.2 Adsorção isotérmica .....	5
2.2.1 Efeito de histerese .....	6
2.2.2 Capacidade de retenção de humidade nos materiais de construção .....	7
2.2.3 Região de adsorção de humidade .....	9
2.2.4 Região de capilaridade de água .....	9
2.2.5 Região de super saturação .....	10
2.3 Influência do teor de água .....	10
2.3.1 Condensações em paredes .....	11
2.3.2 Desenvolvimento de bolores .....	11
2.4 - Condutibilidade térmica .....	12
3 – Desenvolvimento experimental .....	15
3.1 Materiais de construção em estudo .....	15
3.1.1 Viroc .....	16
3.2 Adsorção isotérmica .....	16
3.2.1 Método de ensaio .....	16
3.2.2 Material laboratorial utilizado .....	17
3.2.3 Provetes a utilizar .....	18
3.2.4 Procedimento .....	18
3.2.5 Cálculo .....	21
3.3 Processo de preparação das argamassas .....	22
3.3.1 Materiais constituintes das argamassas .....	22
3.3.2 Procedimento de mistura .....	22
3.3.3 Identificação das argamassas .....	24
3.3.4 Condições de cura .....	24
3.4 Medição da condutibilidade térmica .....	25
3.4.1 Princípio de operação .....	25
3.4.2 Características das sondas .....	25
3.4.3 Factores que influenciam os resultados .....	27



4 - Resultados obtidos .....	29
4.1 Método de análise dos resultados obtidos .....	29
4.2 Argamassas.....	30
4.2.1 Argamassas 1, 2 e 3 .....	33
4.2.2 Argamassas 4, 5 e 6 .....	37
4.2.3 Argamassas 7, 8 e 9 .....	41
4.2.4 Argamassas 10, 11 e 12 .....	45
4.2.5 Argamassas 13, 14 e 15 .....	49
4.2.6 Argamassas 16. 17 e 18 .....	53
4.3 Betão .....	54
4.4 Bloco argila expandida .....	57
4.4.1 Grupo: Betões e argila expandida .....	59
4.5 Poliestireno expandido (EPS) .....	60
4.6 Poliestireno extrudido (XPS).....	61
4.7 Lã mineral .....	62
4.7.1 Grupo: Isolantes térmicos .....	63
4.8 Pedra Natural .....	64
4.8.1 Calcário .....	64
4.8.2 Encarnado Negrais (calcário).....	65
4.8.3 Granito.....	66
4.8.4 Grupo: Pedras Naturais .....	68
4.9 Tijolo cerâmico furado .....	68
4.10 Cerâmica de forra .....	70
4.10.1 Análise de resultados do Grupo: Materiais cerâmicos.....	71
4.11 Madeira .....	72
4.12 Viroc.....	73
4.13 Gesso cartonado.....	75
4.13.1 Grupo: Materiais orgânicos .....	77
5 – Discussão de resultados .....	78
5.1 Discussão da análise de resultados .....	78
5.1.1 Argamassas - Considerações gerais para as argamassas .....	78
5.1.2 Restantes materiais .....	80
5.2 - Análise das curvas higroscópicas através de expressões matemáticas .....	83
5.2.1 Expressão geral [8] .....	84

5.2.2 Betão normal .....	84
5.2.3 Betão leve .....	85
5.2.4 Argamassas .....	86
5.2.5 Tijolo .....	87
5.2.6 Madeira .....	88
5.2.7 Gesso cartonado .....	89
5.2.8 Calcário .....	90
5.3 Comparação de dados do programa Wufi .....	90
5.3.2 Discussão da comparação de dados com o programa WUFI .....	92
5.4 Verificação da influência do teor de água no coeficiente de transmissão térmica .....	92
5.4.1 Exemplo de cálculo da resistência térmica de um tijolo furado .....	93
5.4.2 Exemplo de cálculo do coeficiente de transmissão térmica U .....	95
5.4.3 Cálculo da influência do teor de água no coeficiente de transmissão térmica .....	96
5.4.4 Discussão dos resultados da variação provocada pelo teor de água numa parede .....	98
6 - Conclusões .....	102
6.1 Desenvolvimentos futuros .....	104
Referências Bibliográficas .....	105

# Índice de figuras

Figura 1 - Diagrama psicométrico.....	4
Figura 2 - Exemplo de um gráfico de adsorção isotérmica.....	5
Figura 3 - Pormenor do poro de "tinteiro" .....	7
Figura 4 - Características moleculares de materiais higroscópicos.....	8
Figura 5 - Condições propícias ao desenvolvimento de bolores.....	12
Figura 6 - Provetes dos materiais de construção antes de serem ensaiados.....	15
Figura 7 - Provete de um painel de Viroc.....	16
Figura 8 - Balança analítica.....	17
Figura 9 – Câmara climática.....	17
Figura 10 - Pormenor da temperatura.....	18
Figura 11 – Estufa.....	18
Figura 12 – Saturação das argamassas.....	19
Figura 13 – Saturação dos materiais.....	19
Figura 14 - Exsicador, com sílica gel (a azul).....	20
Figura 15 - Utilização de um papel de filtro para retirar água em excesso.....	21
Figura 16 - Adição de água.....	23
Figura 17 - Molde com as argamassas.....	23
Figura 18 - Sondas utilizadas.....	26
Figura 19 - Pormenor de utilização de uma placa de XPS.....	28
Figura 20 - Tijolo cerâmico furado 30x20x11 cm.....	94

## Índice de quadros

Quadro 1 - Traço volumétrico das 18 argamassas .....	24
Quadro 2 - Alcance de medição das sondas.....	26
Quadro 3 - Precisão de medição das sondas.....	27
Quadro 4 - Sondas a utilizar nos provetes .....	27
Quadro 5 - Classes dos betões .....	59
Quadro 6 - Comparação de dados de condutibilidade térmica do programa Wufi.....	91
Quadro 7 - Comparação de dados de condutibilidade térmica dos restantes materiais .....	91
Quadro 8 - Materiais e respectivas espessuras dos tipos de paredes a estudar .....	92
Quadro 9 - Condutibilidade térmica dos materiais a estudar.....	93
Quadro 10 - Resistências térmicas a considerar .....	95
Quadro 11 - Variação provocada pela variação do teor em água no coeficiente U .....	96

# 1 - Introdução

Desde os tempos primitivos que o ser humano tenta proteger-se das condições desfavoráveis do meio ambiente. Primeiramente, usou esconderijos naturais, começando mais tarde a utilizar abrigos provisórios construídos com o auxílio de pedras, ossos e madeiras. Passo a passo foi aperfeiçoando o uso e o tratamento de novos objectos e materiais, alcançando conhecimento tecnológico de forma a construir cada vez melhores habitações. Nos tempos de hoje o ser humano não está somente limitado às dificuldades de execução, mas principalmente à pressão económica, que o leva a procurar actividades mais eficientes e com menores custos associados.

O conhecimento do comportamento dos materiais de construção em relação ao seu teor de água é hoje em dia de extrema importância. Actividades como a prevenção e restauro que evitem a deterioração de edifícios históricos ou a evolução do comportamento térmico das paredes de edifícios estão fortemente ligados a questões de comportamento dos materiais em relação à humidade.

Nos materiais de construção a humidade pode ficar retida sob diversas formas, designadamente vapor, água e gelo. Perceber a capacidade dos materiais de construção de reter humidade é essencial para a resolução de diversos problemas existentes em todo o tipo de edifícios.

A humidade relativa é um dos mais importantes parâmetros que influenciam a qualidade do ar interior e o conforto humano dentro das habitações. Elevados valores de humidade numa habitação podem resultar em problemas de saúde, principalmente respiratórios, resultantes de crescimentos microbiológicos e da degradação de componentes de materiais de construção.

Por estas razões, negligenciar o transporte de vapor de água entre o ar e os materiais, pode levar a sérios erros em edifícios. No presente estudo pretende-se analisar o comportamento dos materiais de construção pela adsorção isotérmica. A análise da adsorção isotérmica representa um importante papel no estudo do comportamento dos materiais, especialmente na estimativa do teor de água e nos efeitos de histerese devido ao efeito adsorção-desadsorção. A maioria dos materiais são de natureza higroscópica e portanto com capacidade para libertar ou acumular humidade consoante as condições ambientais dos edifícios.

Os materiais de construção têm extrema importância no comportamento em relação à adsorção e desadsorção, pois podem moderar ou atenuar a amplitude da humidade relativa no interior dos edifícios e, por conseguinte, participar no

melhoramento da qualidade do ar interior e na poupança da energia consumida pelos edifícios.

Para além da adsorção isotérmica, este estudo incidirá igualmente na variação da condutibilidade térmica para diferentes valores de teor de água. Esta questão será de extrema importância na simulação do comportamento real de uma parede de um edifício corrente à transferência do fluxo de calor em diferentes condições ambientais.

## **1.2 - Objectivo**

O principal objectivo desta dissertação visa o estudo da influência do teor de água nos materiais de construção. Nesse sentido pretende-se analisar a adsorção isotérmica em diversos tipos de materiais, tais como, argamassas, betão, tijolos furados, pedras naturais, madeiras e diversos isolantes térmicos. Para isso manter-se-á a temperatura constante a 23°C, variando a humidade relativa entre 40% e 95%.

Posteriormente saturar-se-á em água estes materiais de construção e verificar-se-á o seu comportamento, tanto em relação à variação do seu teor em água, bem como à variação da respectiva condutibilidade térmica, registando em que medida o teor de água altera as características térmicas de uma parede.

O presente trabalho foi organizado em 6 capítulos. No capítulo 2 foram abordados os aspectos gerais da adsorção isotérmica e da influência do teor de água nos materiais de construção. No capítulo 3 foi apresentado o desenvolvimento experimental da adsorção isotérmica, da preparação das argamassas e da medição da condutibilidade térmica. No capítulo 4 são expostos os resultados obtidos e realizada uma breve análise de resultados. No capítulo 5 é feita uma discussão comparativa de resultados, com análises através de expressões matemáticas, de comparação de dados com o programa WUFI e é verificada a influência do teor de água no coeficiente de transmissão térmica. Por fim, no capítulo 6 apresentam-se as conclusões finais e desenvolvimentos futuros.

## **2 - Análise do conhecimento**

### **2.1 Considerações gerais sobre os fenómenos de adsorção e desadsorção**

Na discussão sobre os conceitos fundamentais da adsorção importa distinguir a adsorção da absorção. Em muitos casos, estes dois fenómenos ocorrem simultaneamente e não é fácil distingui-los um do outro. É relevante ainda referir que a palavra sorção emprega-se para designar um fenómeno que engloba a adsorção e a absorção mas que não é necessariamente uma soma dos dois processos. O processo inverso designa-se por desadsorção.

A adsorção é um processo espontâneo de adesão física ou de ligação de moléculas, que ocorre sempre que uma superfície de um sólido é exposta a um gás ou um líquido, e o grau de adsorção depende da temperatura, da pressão e da área de superfície. Enquanto a absorção distingue-se da adsorção pelo facto de constituir uma incorporação pelo volume de uma determinada substância.

Em termos mais simples, a adsorção localiza-se na superfície, enquanto na absorção penetra na estrutura. Normalmente essa ligação de moléculas à superfície na adsorção é relativamente fraca e reversível.

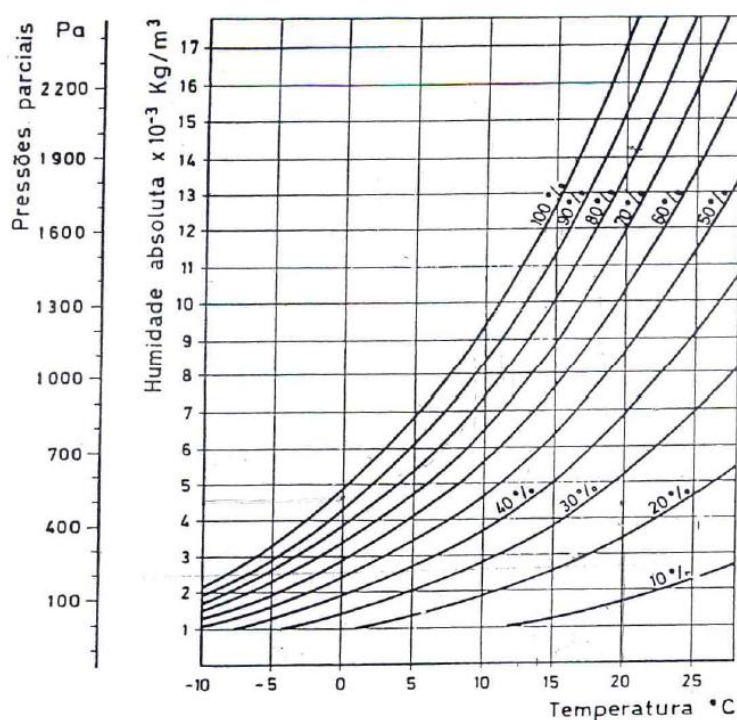
Estes fenómenos ocorrem em consequência de o ar ser constituído por uma mistura de gases e por vapor de água, que em contacto com os materiais de construção vão originar fenómenos de adsorção. A quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter é designada por limite de saturação, variando na razão directa da temperatura, isto é, aumentando e diminuindo consoante a temperatura do ar vai igualmente aumentando ou diminuindo.

Outro factor que influencia a quantidade de vapor de água no ar é a humidade relativa, que é designada pelo quociente da quantidade de vapor de água que o ar contém (humidade absoluta) pela quantidade máxima que poderia conter a essa temperatura (limite de saturação), expresso em percentagem. Pelo que, quando o ar se encontra no seu limite de saturação, a respectiva humidade relativa é de 100%.

Assim, a humidade relativa de uma massa de ar varia consoante a temperatura a que esse ar se encontre. Por exemplo, se a temperatura aumentar, mantendo-se a humidade absoluta, este aumento de temperatura vai provocar uma diminuição da sua humidade relativa. As relações existentes entre as humidades absolutas e relativas e a temperatura do ar são expressas através dum diagrama psicométrico representado na

fig. 1, através do qual se poderá compreender mais facilmente os conceitos referidos anteriormente.

Este diagrama psicométrico apresenta como abcissa os valores da temperatura do ar, como ordenada os valores de humidade absoluta e um conjunto de curvas de humidade absoluta. As linhas horizontais representam pontos de igual humidade absoluta e as linhas verticais de igual temperatura [9].



**Figura 1 - Diagrama psicométrico [9]**

No âmbito deste estudo manter-se-á a temperatura constante e alterar-se-á a humidade relativa, com o objectivo de estudar a forma como os materiais de construção se comportam perante diferentes níveis de humidade, e como irão variar os respectivos teores de água dos materiais em questão.

É importante ainda referir que o teor de água é definido como o peso da água contido numa determinada amostra dividido pelo peso seco dessa mesma amostra, expresso em percentagem. O teor de água é usado numa ampla variedade de áreas científicas e técnicas, podendo variar de zero (totalmente seco) até ao valor máximo de saturação dos poros.



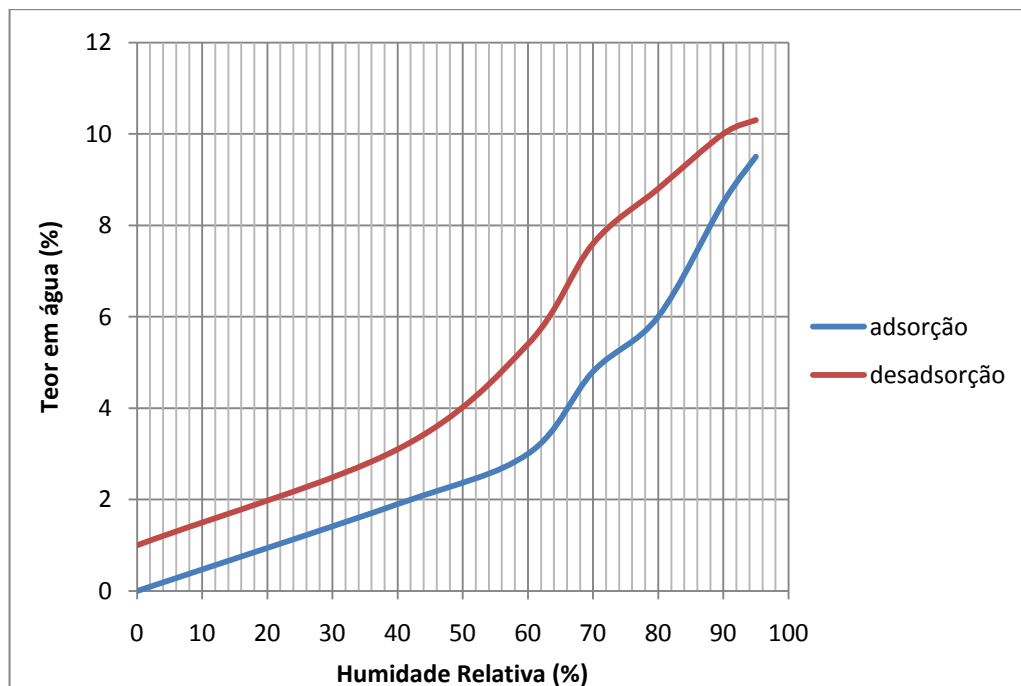
## 2.2 Adsorção isotérmica

A capacidade dos materiais de adsorverem vapor de água a temperatura constante é denominada adsorção isotérmica. Esta capacidade é muito útil no desenvolvimento de novos modelos de transporte de humidade e na avaliação das propriedades micro estruturais dos materiais. Neste estudo a medição da adsorção isotérmica será realizada através de uma técnica gravimétrica que permite analisar o equilíbrio de adsorção de um material [10].

No processo de ensaio da adsorção isotérmica, os provetes são expostos a uma série de valores de humidade relativa, sendo os mesmos monitorizados até a massa do provete alcançar o equilíbrio em cada respectivo valor de humidade relativa. Assim, os valores de equilíbrio de massa são utilizados para criar um gráfico isotérmico que se divide em dois processos: adsorção (aumento da humidade relativa) e desadsorção (inicia com o material saturado, e vai diminuindo a respectiva humidade relativa).

Os gráficos resultantes do processo de adsorção isotérmica apresentam como abcissa os valores de humidade relativa e como ordenada os respectivos valores de teor em água, ambos expressos em percentagem [5].

Este método de ensaio representa a quantidade de água adsorvida pela superfície dos provetes em estudo em função do vapor de água existente no ar. A adsorção isotérmica é muitas vezes usada como modelo empírico, mas é preciso ter em atenção que as suas conclusões dependem de diferentes variáveis.



**Figura 2 - Exemplo de um gráfico de adsorção isotérmica**

### **2.2.1 Efeito de histerese**

A histerese é um fenómeno observado em alguns materiais, no qual certas propriedades dependem de estados anteriores.

Para a maioria dos materiais de construção, em especial os materiais em que ocorre condensação capilar, a adsorção isotérmica tem um perfil em forma de S e normalmente apresenta um efeito de histerese entre os fenómenos de adsorção e desadsorção, tal como é representado na fig.2.

Este efeito é resultado de características de secagem diferentes para a adsorção e desadsorção, ou devido à geometria do espaço dos poros. Contudo, medições realizadas por Kunzel mostram que para a maioria dos materiais de construção o efeito de histerese é tão ligeiro que a adsorção isotérmica é adequada para caracterizar a região de adsorção de humidade [12].

### **Efeito de histerese em pastas de cimento**

O efeito de histerese entre adsorção/desadsorção é bastante significativo para pastas de cimento. Assim, a histerese de adsorção tem de ser considerada para uma previsão adequada do teor de água higroscópico.

Para se poder entender o porquê do efeito de histerese temos de compreender a estrutura porosa das pastas de cimento, sendo estas compostas por poros de gel (raio até 10 nanómetros), poros capilares (varia de 10 nanómetros até 10 micrómetros) e por espaços vazios de ar (podendo variar de 0,1 a 1 milímetro) [3].

Os poros de gel constituem a principal componente das pastas de cimento e são responsáveis pela resistência e respectiva microestrutura. Diversos estudos confirmam que estes poros são produzidos na sua maioria no processo de hidratação do cimento.

Já os poros capilares apresentam uma forma irregular, e o seu tamanho pode variar entre 10 nanómetros e 10 micrómetros. A água nestes poros capilares é quase totalmente evaporável para humidades relativas inferiores a 40%, sendo que para humidades relativas superiores a 40% a condensação capilar começa a ocorrer. O fluído que os poros capilares contêm não é água pura, mas sim uma solução iónica que está em equilíbrio com a pasta hidratada. Este fluído pode congelar nos poros capilares, mas não nos poros de gel, dado estes poros serem demasiado pequenos para o permitirem.

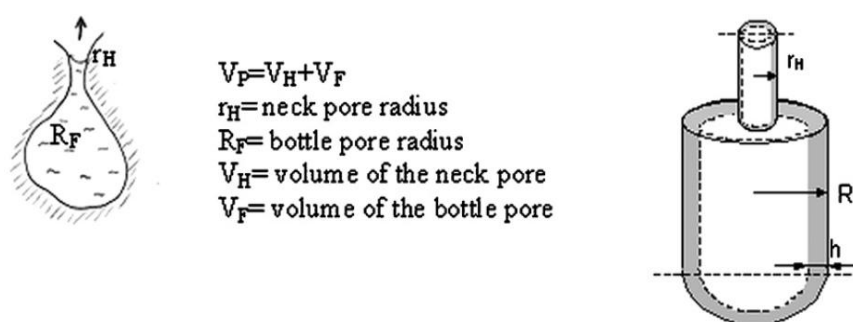
A condensação capilar resulta da relação entre a pressão de vapor e os raios capilares, sendo de salientar que a curvatura de interface depende da geometria dos poros.

De acordo com o conhecimento existente, a mudança nos poros de gel é resultado da formação dos designados poros de "tinteiro" no gel do cimento. Esta alteração resulta da intensidade do processo de secagem e do envelhecimento químico [7].

Estes poros de "tinteiro" só são acessíveis através de um "pescoço" muito estreito (como se pode observar na fig.3), o que leva a complicadas descrições matemáticas dos processos de condensação capilar.

É necessário ainda considerar que as pastas de cimento não são materiais inertes. Isto significa que os processos de envelhecimento químico podem ser uma das razões para a histerese de adsorção, causando uma mudança irreversível da estrutura dos poros devido à compressão das partículas de gel do cimento.

De acordo com diversos estudos, quanto maior for a humidade relativa no processo de secagem, melhor será a distribuição do tamanho dos poros. Contudo se a secagem for suficientemente agressiva é possível extrair a água enclausurada destes poros.



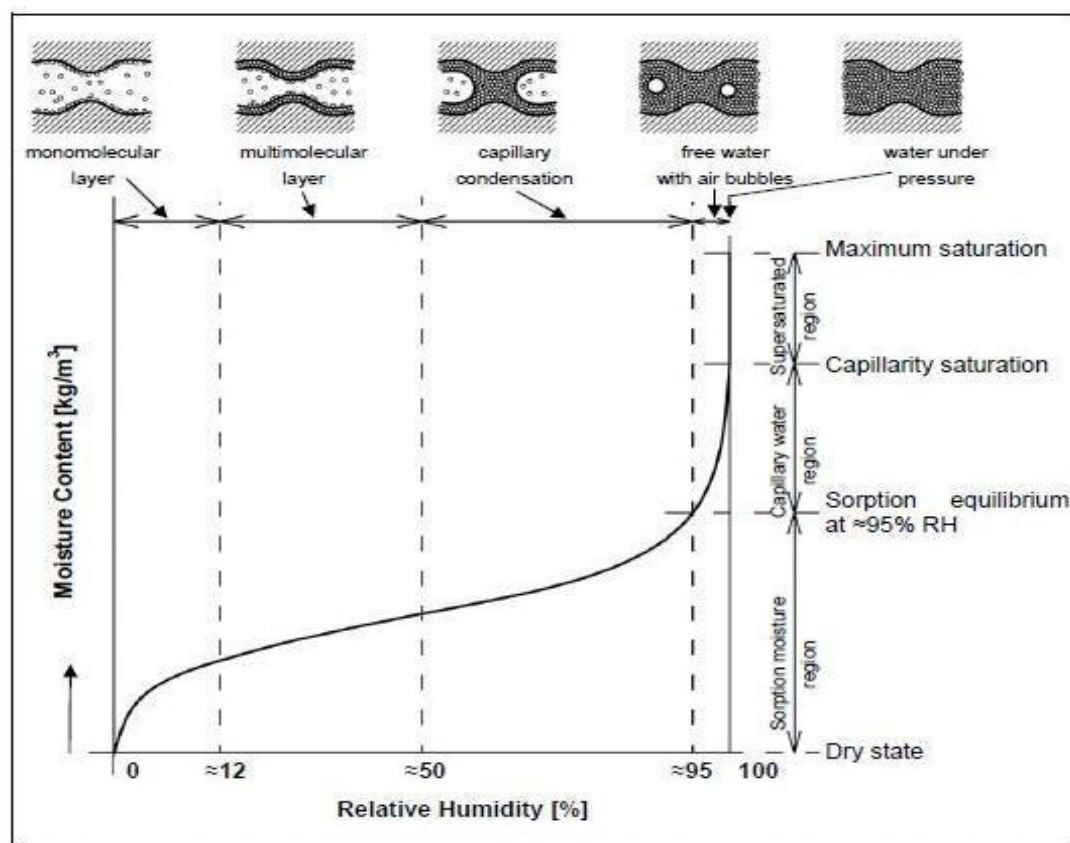
**Figura 3 - Pormenor do poro de "tinteiro" [7]**

### **2.2.2 Capacidade de retenção de humidade nos materiais de construção**

A grande maioria dos materiais de construção são higroscópicos, o que significa que adsorvem vapor de água da humidade do ar até atingirem o equilíbrio. Este comportamento pode ser descrito pelas curvas de adsorção isotérmica (apesar de, para alguns materiais, a variação de temperatura ser desprezável).

A diferente capacidade dos materiais de reter humidade é devida à desigual porometria dos materiais constituintes (por exemplo, numa parede quanto menor o diâmetro dos poros, maior será a altura teórica a que a água poderá atingir). Assim, a maioria dos materiais de construção em contacto com humidade, adsorvem-na por sucção capilar até atingirem um certo grau de saturação, designada de saturação capilar.

É possível distinguir três regiões de humidade que podem ocorrer nos materiais de construção devido ao incremento das condições de humidade. As regiões são: região de adsorção de humidade, região de capilaridade de água e região de super saturação. Estas três regiões caracterizam a capacidade de retenção de humidade dos materiais higroscópicos. Nos materiais não higroscópicos (por exemplo os isolantes térmicos) só ocorre a região de super saturação [18].



**Figura 4 - Características moleculares de materiais higroscópicos [18]**

### **2.2.3 Região de adsorção de humidade**

Esta região varia desde o estado seco até a um estado de equilíbrio de humidade relativa de 95%, incluindo todos os teores em água resultantes da adsorção do vapor de água até ao estado de equilíbrio.

A região do gráfico até 15% de humidade relativa demonstra ter pouca variação, visto ser uma região de revestimento monomolecular das superfícies do sólido, seguida de uma transição linear até uma área de revestimento multimolecular, terminando por volta dos 50 % de humidade relativa. Isto significa que até 50% de humidade relativa não ocorre condensação capilar, como se pode observar na figura 4.

Após esta fase de revestimento monomolecular, a área da curva de adsorção aumenta bastante sendo atribuído este fenómeno à condensação capilar, ou seja, ao aparecimento de condensação nos micro poros (ocorrendo até aos 95% de humidade relativa). A capacidade de adsorção resulta de um conjunto de factores tais como a tensão de superfície dos líquidos, a humidade dos sólidos em contacto com os líquidos e depende ainda do raio dos poros [3].

### **2.2.4 Região de capilaridade de água**

Quando um material de construção entra em contacto com água líquida, este é adsorvido até atingir a saturação capilar. Saturação capilar é definida como a capacidade máxima de conter água através da adsorção em condições de pressão normais, sem a influência de pressões exteriores. Também designada de região de super-higroscopicidade, visto que é nesta região que a capilaridade dos poros dos materiais adsorve água até à saturação capilar [11].

A saturação capilar tem sempre um valor inferior ao teor de água máximo possível no espaço dos poros dos materiais. Isto deve-se à presença de bolhas de ar que provocam que nem todos os espaços dos poros possam ser preenchidos por água.

Em relação à capacidade de preencher os poros dos materiais, é importante referir que quando dois materiais não têm a mesma distribuição de tamanho dos seus poros, a capacidade destes de adsorver água também vai ser diferente.

### 2.2.5 Região de super saturação

A região de super saturação procede a saturação capilar, uma vez que só se pode atingir esta região através da aplicação de pressão exterior (aplicação de vácuo com o objectivo de remover o ar preso dentro dos poros). A curva de teor em água resultante é designada por curva de retenção.

Nesta região a humidade relativa é sempre igual a 100%, sendo esta região marcada por um processo de transição, já que este estado de equilíbrio não consegue ocorrer em condições naturais. Assim, esta região é melhor definida em materiais hidrófobos, tais como isolantes térmicos [18].

Como diversos estudos o sugerem não se chega a um equilíbrio do teor de água nesta região, logo esta região de super saturação vai ser ignorada neste estudo.

## 2.3 Influência do teor de água

O teor de água é definido pelo peso da água contido numa determinada amostra expresso em percentagem. Pode variar entre 0 % (completamente seco) até um valor máximo permitido pela porosidade do material em questão. Esta variação do teor de água irá alterar as características de funcionamento dos materiais de construção.

O acréscimo do teor de água nos materiais de construção que compõem uma parede, provocará uma diminuição da respectiva resistência térmica desta, que associado ao decréscimo das temperaturas superficiais provocado pela evaporação de água, poderá propiciar a ocorrência de condensações superficiais [9].

No caso do interior dos edifícios, o arrefecimento das massas de ar verifica-se de uma forma localizada junto dos paramentos das paredes exteriores, em particular nas zonas de pontes térmicas. Em condições de Inverno, as faces interiores das paredes exteriores encontram-se em geral, a uma temperatura inferior ao ar ambiente. A temperatura superficial interior pode ser calculada através da expressão:

$$(1) \quad \theta_i = t_i - \frac{1}{h_i} \cdot U \cdot (t_i - t_e)$$

onde  $U$  é o coeficiente de transmissão térmica da parede ( $\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ),  $t_i$  e  $t_e$  são as temperaturas do ar interior e exterior respectivamente (em  $^\circ\text{C}$ ) e  $1/h_i$  é a resistência térmica superficial interior ( $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$ ).

Como o teor de água altera as características de transmissão térmica dos materiais, uma variação acentuada do teor em água poderá provocar um mau funcionamento térmico de uma parede.

### **2.3.1 Condensações em paredes**

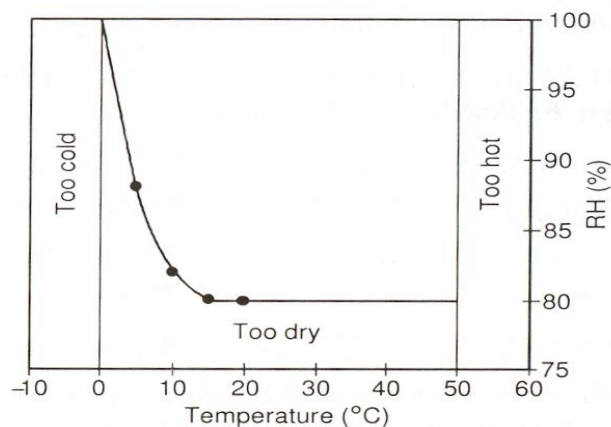
As condensações ocorrem no interior das paredes sempre que num dado ponto a pressão parcial do vapor de água que atravessa a parede por difusão, iguala a pressão de saturação correspondente à temperatura desse ponto. Os factores que influenciam são as características do isolamento térmico e as características de permeabilidade ao vapor de água dos vários materiais que constituem as paredes.

As condensações de vapor de água no interior das paredes não dão origem em princípio, a distúrbios visíveis. No entanto podem provocar o apodrecimento de materiais orgânicos, o destaque de materiais, entre outros.

### **2.3.2 Desenvolvimento de bolores**

Os fenómenos de condensação propiciam o desenvolvimento de bolores, principalmente em locais onde o isolamento térmico não é suficiente ou se a ventilação dos locais for escassa ou inexistente, como sucede por exemplo atrás dos móveis. Com efeito, os esporos de vários tipos de microrganismos existem correntemente no ar e sempre que sejam criadas as condições necessárias para o seu desenvolvimento, os microrganismos proliferam e dão origem a manchas de bolor.

O desenvolvimento de bolores pode ocorrer em diversos tipos de materiais. Necessitam de níveis de humidade relativa suficientemente elevados ou de contactar directamente com água, visto que humidades relativas superiores a 75-80% são críticas para o desenvolvimento de bolores na superfície dos materiais de construção.



**Figura 5 - Condições propícias ao desenvolvimento de bolores [18]**

Segundo diversos estudos, os requisitos necessários para o desenvolvimento de bolores são:

- 30 dias de duração, com umidade relativa até aos 80%, com temperaturas que podem variar entre 5°C e 40°C.
- 7 dias de duração, com umidade relativa na superfície até aos 98%, com temperaturas que podem variar entre 5°C e 40°C.
- 24 horas de duração, com umidade relativa na superfície até aos 100%, com temperaturas que podem variar entre 5°C e 40°C.

Estes dados não são aplicáveis para todos os materiais de construção, já que existem materiais resistentes ao desenvolvimento de bolores, tais como o betão, vidro e metais, ou materiais que tenham sido quimicamente alterados de forma a resistir às também designadas colonizações biológicas.

## 2.4 - Condutibilidade térmica

A taxa de transporte de calor entre dois sistemas pode ser alterada se entre eles for colocada uma barreira que ofereça alguma resistência à passagem da energia. Designemos estas barreiras de separação entre dois subsistemas por paredes, de acordo com a nomenclatura usada habitualmente em termodinâmica. A taxa a que a energia térmica é transferida através de paredes é função, entre outras coisas, do material de que é constituído e das suas características geométricas.



A condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) é uma propriedade que caracteriza os materiais termicamente homogêneos e que representa a quantidade de calor  $Q$  transmitida através de uma espessura  $L$ , numa direcção normal à superfície de área  $A$ , devido a uma variação de temperatura  $\Delta T$ , sob condições de estado fixo e quando a transferência de calor é dependente apenas da variação de temperatura, expresso em  $W/(m \cdot ^\circ C)$ , representando no fundo a capacidade de um material em conduzir calor.

O valor da condutibilidade térmica é muito influenciado pela existência de cavidades elementares, ocupadas por ar, por exemplo em materiais porosos ou alveolares. Estas cavidades podem ser propositadas, ou acidentais, devido a certos processos tecnológicos, mudanças ou danos na estrutura. Normalmente este valor de condutibilidade térmica não é constante durante toda a vida útil de um material, podendo ser alterado como consequência de factores como a temperatura, humidade ou envelhecimento.

O coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) é definido como o fluxo de calor que atravessa na unidade de tempo uma área unitária, expresso em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ . O inverso de  $U$  é igual à resistência térmica da parede ( $R$ ), sendo que estas duas grandezas traduzem a forma como um elemento se deixa atravessar com maior ou menor dificuldade pelo calor.

A resistência térmica ( $R$ ) é ainda o resultado do quociente espessura / condutibilidade e expressa-se em  $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$ .

A determinação dos coeficientes de transmissão térmica nesta dissertação está orientada essencialmente para a análise da influência do teor em água neste mesmo coeficiente, considerando-se uma condução de calor unidireccional e em regime permanente.

Considerando que os elementos de um edifício não podem ser analisados de forma isolada, dado existirem trocas de calor entre os elementos e aqueles em que se integram, define-se por coeficiente de transmissão térmica  $U$  (expresso em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ) o valor obtido da seguinte expressão:

$$(2) \quad U = \frac{1}{(R_{si} + \sum R_i + R_{se})}$$

Por existirem processos de convecção e radiação no exterior e no interior dos edifícios, forma-se também uma zona onde o fluxo de calor encontra resistências no contacto com a superfície do elemento, denominadas resistências térmicas superficiais  $R_{se}$  e  $R_{si}$ , que resultam do efeito combinado de transmissão de calor por convecção e da

transmissão de calor por radiação. Os coeficientes  $R_{se}$  e  $R_{si}$  são fixados e para efeitos práticos de aplicação, são usados na União Europeia valores convencionais registados no ITE50. Para elementos verticais, usam-se os seguintes valores [16]:

$$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\cdot^{\circ}\text{C) /W}$$

$$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot^{\circ}\text{C) /W}$$

Existem ainda resistências térmicas de espaços de ar não ventilados (considerando-se um espaço de ar não ventilado aquele que não dispõe de aberturas ou orifícios de ventilação para o exterior). Para este tipo de resistências adopta-se os valores preconizados na Norma europeia EN ISO 6946:1996 [22].

Outro factor a ter em conta no cálculo do coeficiente de transmissão térmica  $U$  é a resistência térmica de tijolos furados ou dos blocos de argila expandida, já que não são materiais homogéneos apresentando espaços de ar no seu interior. Assim, terá de ser calculada uma resistência térmica média, que será demonstrada posteriormente.

A condutibilidade térmica é uma das principais variáveis envolvidas nos projectos de comportamento térmico dos edifícios, havendo toda uma linha de pesquisa voltada para o conforto térmico no interior das habitações. Para o caso dos materiais porosos, a condutibilidade térmica destes é em geral dependente tanto da temperatura como do seu teor em água.

## 3 – Desenvolvimento experimental

### 3.1 Materiais de construção em estudo

Os materiais de construção em análise nesta dissertação representam uma parte da extensa gama dos materiais que normalmente constituem uma parede de um típico edifício. A escolha destes materiais recaiu essencialmente nos de maior utilização em edifícios correntes, ou por possuírem características únicas que justifiquem o seu estudo.

Foram utilizados os seguintes materiais de construção:

- Diversos tipos de argamassas
- Betão normal
- Bloco de argila expandida
- Viroc
- Gesso cartonado
- Poliestireno expandido (EPS)
- Poliestireno extrudido (XPS)
- Lã mineral
- Tijolo cerâmico furado
- Cerâmica de forra
- Madeira
- Granito
- Calcário
- Encarnado Negrais (calcário)



**Figura 6 - Provetes dos materiais de construção antes de serem ensaiados**

### **3.1.1 Viroc**

O VIROC é um painel compósito, de superfícies planas, composto por uma mistura de partículas de madeira e cimento Portland, comprimida e seca. Combina a resistência e a flexibilidade da madeira com a durabilidade e rigidez do cimento, permitindo a sua utilização tanto em espaços exteriores como em interiores.

O produto VIROC ensaiado neste estudo foi o VIROC NEGRO, sendo este um painel fabricado com uma tonalidade negra, possuindo superfícies lisas e planas, tendo neste caso um acabamento de superfície bruto.



**Figura 7 - Provete de um painel de Viroc**

## **3.2 Adsorção isotérmica**

### **3.2.1 Método de ensaio**

O presente estudo foi desenvolvido com a finalidade de analisar a influência do teor em água nos materiais de construção. A norma que especifica o procedimento laboratorial para a determinação da adsorção higroscópica isotérmica de materiais de construção é a Norma ASTM C1498 -04, elaborada nos Estados Unidos da América pela comissão da ASTM Thermal Insulation.

O objectivo deste método de ensaio é obter para uma determinada temperatura constante os valores de equilíbrio do teor de água em diversos níveis de humidade relativa. Apesar de a desadsorção ser o método inverso da adsorção, a maioria dos materiais porosos apresentam valores de equilíbrio diferentes nestes dois processos. Normalmente o teor em água na desadsorção apresenta valores superiores do que na adsorção para os mesmos níveis de humidade relativa. A este efeito dá-se o nome de histerese.

### 3.2.2 Material laboratorial utilizado

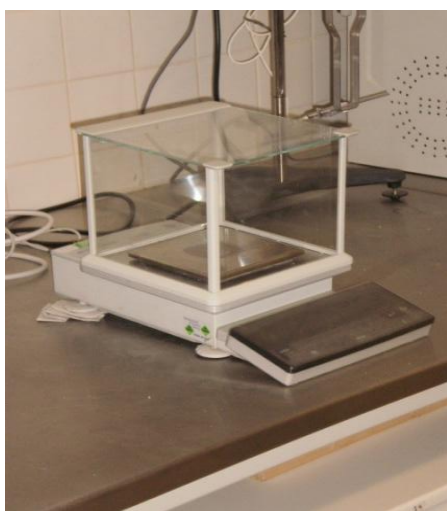
Caixas de petri – basicamente servem de recipientes para colocação dos provetes.

Balança – tem de ser uma balança analítica, em que a sua precisão seja de pelo menos  $\pm 0,1\%$  do total do peso total do provete em causa.

Estufa – com capacidade de manter a temperatura dentro de  $\pm 2^\circ\text{C}$  para temperaturas menores que  $75^\circ\text{C}$ , e de  $\pm 4^\circ\text{C}$  para temperaturas superiores a  $75^\circ\text{C}$ .

Câmara climática – com capacidade de manutenção da humidade relativa numa margem de  $\pm 3\%$  e da temperatura de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Exsicador – utilizado após os materiais saírem da estufa. Serve para arrefecer os provetes sem permitir que estes alterem o seu teor em água; usa-se sílica gel para absorver a humidade presente no exsicador.



**Figura 8 - Balança analítica**



**Figura 9 – Câmara climática**



**Figura 10 - Pormenor da temperatura e HR na câmara climática**



**Figura 11 - Estufa**

### 3.2.3 Provetes a utilizar

De acordo com a presente norma, a massa mínima dos provetes é de 10g. Estes podem ser cortados ou partidos em diversos pedaços pequenos, mas não de forma a ficar em pó, com o objectivo de reduzir o tempo necessário para o provete atingir o equilíbrio com as condições de ambiente a que estará sujeito.

### 3.2.4 Procedimento

A temperatura específica para este ensaio é de 23°C.

1. Determinação do peso seco – colocar o provete na estufa no mínimo durante 24 horas. Posteriormente arrefecer num exsicador e pesar o provete em causa após este arrefecer. Repetir este processo de pesagem, até três pesagens com diferença menor a 0,1% do peso obtido na última pesagem. Após a massa do provete estabilizar, definir este peso como o peso seco.
2. Determinação da adsorção isotérmica – após a determinação do peso seco, colocar a caixa de petri com o provete na câmara climática à respectiva humidade relativa e periodicamente ir pesando até este atingir o equilíbrio com o ambiente.

É considerada massa constante se em cinco pesagens consecutivas com 24 horas de intervalo a variação de massa for menor a 0,1% da massa do provete. Posteriormente à determinação da massa constante para um respectivo nível de humidade relativa, vai-se aumentando os valores de humidade relativa sucessivamente até se atingir o valor máximo.

3. Níveis de humidade relativa a utilizar na câmara climática – sabendo que a norma em causa determina como valor mínimo de humidade relativa 30% e máximo 98%. Optou-se por seis níveis de humidade relativa: 40%, 60%, 70%, 80%, 90% e 95%.
4. Saturação do provete – o material deverá ser imerso em água durante 7 dias.



**Figura 12 – Saturação das argamassas em água**



**Figura 13 – Saturação dos materiais em água**

5. Determinação da desadsorção isotérmica – o ponto de partida para esta determinação é o material totalmente saturado de água. De seguida, colocar a caixa de petri com o provete na câmara climática à respectiva humidade relativa e periodicamente ir pesando até este atingir o equilíbrio com o ambiente. A diferença deste procedimento com o da adsorção isotérmica, é que após a determinação da massa constante vai-se diminuindo os níveis de humidade relativa até se atingir o valor mínimo.

## **Notas do procedimento**

### **1. Temperatura a utilizar na estufa:**

- Nos materiais que não alteram a sua estrutura ou dimensões, como por exemplo os minerais, utilizaram-se temperaturas de  $105^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ .
- Nos materiais que podem alterar a sua estrutura em contacto com elevadas temperaturas, tais como os materiais de poliestireno, utilizaram-se temperaturas de  $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

### **2. Modo de pesagem:**

- Em primeiro lugar pesar a caixa de petri vazia e registar a sua massa.
- Depois, colocar dentro desta caixa de petri o provete em questão, e registar agora a massa conjunta.
- A partir deste momento sempre que se quiser determinar a massa do provete, só ter-se-á de subtrair à massa conjunta a massa da caixa de petri.

### **3. Modo de utilização do exsicador:**

- Para se garantir um bom funcionamento do exsicador será necessário condicionar a sílica gel a utilizar, já que esta retém a humidade do ar por adsorção. Assim, será necessário colocar a sílica gel em estufa a temperaturas superiores a  $100^{\circ}\text{C}$  e inferiores a  $200^{\circ}\text{C}$ , para garantir o seu bom funcionamento, num período nunca inferior a 1 hora.
- É imperioso garantir a estanqueidade do exsicador à entrada de ar exterior.



**Figura 14 - Exsicador, com sílica gel (a azul)**



#### 4. Modo de retirar água em excesso dos provetes:

- Para materiais como pedras, madeira ou isolantes, a água pode ser retirada facilmente, dado que os materiais são bastante consistentes e de não dissolverem-se em contacto com a água.
- Para materiais como as argamassas ou o betão utiliza-se uma técnica que consiste na utilização de um papel de filtro para escoar a água em contacto com os provetes.



**Figura 15 - Utilização de um papel de filtro para retirar água em excesso**

#### **3.2.5 Cálculo**

Para se calcular o teor em água de um determinado provete será necessário determinar a massa seca (massa do provete após condicionamento na estufa) e a massa em equilíbrio (massa do provete após exposição em câmara climática a determinado nível de humidade relativa). Para tal terá de se utilizar a seguinte expressão:

$$(3) \quad u = \frac{(m - m_o)}{m_o}$$

em que:

$m$  = massa em equilíbrio

$m_o$  = massa seca

$u$  = teor em água

### 3.3 Processo de preparação das argamassas

#### 3.3.1 Materiais constituintes das argamassas

No âmbito desta dissertação foram realizados dois tipos distintos de argamassas, as argamassas tradicionais de cimento e as argamassas de cal. Com a finalidade de explorar as particularidades dos materiais de construção perante o contacto com diferentes níveis de humidade relativa, foram realizadas 18 argamassas com traços volumétricos diferentes.

Nas argamassas foi usada areia de rio e cimento Portland tipo II BL 32,5N, nas amassaduras realizadas foi utilizada água potável da rede pública. Nas argamassas bastardas foi ainda usada cal aérea da marca Lusical.

##### Argamassas de cimento:

Traço volumétrico cimento/areia	Relação água/ligante
1:3	0,6; 0,7; 0,8
1:4	0,6; 0,7; 0,8
1:5	0,6; 0,7; 0,8

##### Argamassas de cal:

Traço volumétrico cimento/cal/areia	Relação água/ligante
1:1:6	0,6; 0,7; 0,8
1:2:9	0,6; 0,7; 0,8
1:3:12	0,6; 0,7; 0,8

#### 3.3.2 Procedimento de mistura

1. Colocar o volume pretendido dos materiais a utilizar na preparação das argamassas no interior dos respectivos copos de bico.
2. Humedecer a base onde se irá realizar a mistura, para evitar que a base absorva água da própria mistura.

3. Adicionar a areia, ao cimento e a cal aérea (se necessário), e com a ajuda da colher de pedreiro homogeneizar os materiais o máximo possível.
4. De seguida, vai-se adicionar água aos poucos e realizar a amassadura com a ajuda de uma de colher de pedreiro.
5. Quando estiver incorporada toda a água na mistura, com o auxílio de uma colher de pedreiro mais pequena, colocar a amassadura nos moldes.
6. Colocar moldes com as argamassas em local com temperatura e humidades relativas moderadas em período de cura, que deverá ter no mínimo 28 dias.

#### **Notas do procedimento:**

- É necessário aplicar descofrante antes da colocação da argamassa nos moldes.
- Como os volumes dos provetes são de 200 cm<sup>3</sup>, para a realização das amassaduras utilizar um volume de areia de 200 cm<sup>3</sup>; a partir desse volume de areia vão-se fazer as relações com os outros materiais constituintes das argamassas (cimento, água e cal aérea).
- O molde usado só permite fazer 9 provetes, pelo que são necessárias 18 amassaduras em dois dias distintos para se poder efectuar os 18 provetes necessários



**Figura 16 - Adição de água**



**Figura 17 - Molde com as argamassas**

### 3.3.3 Identificação das argamassas

Para uma identificação inequívoca das argamassas a ensaiar, foi estabelecida uma numeração de 1 a 18 que individualiza cada uma delas. As primeiras 9 são argamassas de cimento enquanto as restantes 9 são argamassas de cal.

**Quadro 1 - Traço volumétrico das 18 argamassas**

Numero	V areia (cm <sup>3</sup> )	V cimento (cm <sup>3</sup> )	V água (cm <sup>3</sup> )	V cal aérea (cm <sup>3</sup> )	Traço cim/cal/areia (cm <sup>3</sup> )	Relação A/L
1	200	66,7	40	0	1:0:3	0,6
2	200	66,7	46,7	0	1:0:3	0,7
3	200	66,7	53,3	0	1:0:3	0,8
4	200	50	40	0	1:0:4	0,6
5	200	50	46,7	0	1:0:4	0,7
6	200	50	53,3	0	1:0:4	0,8
7	200	40	40	0	1:0:5	0,6
8	200	40	46,7	0	1:0:5	0,7
9	200	40	53,3	0	1:0:5	0,8
10	200	33,3	40	33,3	1:1:6	0,6
11	200	33,3	46,7	33,3	1:1:6	0,7
12	200	33,3	53,3	33,3	1:1:6	0,8
13	200	22,2	40	44,4	1:2:9	0,6
14	200	22,2	46,7	44,4	1:2:9	0,7
15	200	22,2	53,3	44,4	1:2:9	0,8
16	200	16,7	40	50	1:3:12	0,6
17	200	16,7	46,7	50	1:3:12	0,7
18	200	16,7	53,3	50	1:3:12	0,8

### 3.3.4 Condições de cura

Numa primeira fase, imediatamente após a realização das amassaduras, colocar o molde em local com temperatura e humidade relativa moderadas durante um período de 3 a 4 dias. Ao terminar este período de cura inicial, remover os provetes dos seus respectivos moldes e colocar no mesmo local, durante um período adicional de 28 dias.

### **3.4 Medição da condutibilidade térmica**

A determinação da condutibilidade térmica dos diversos materiais usados neste estudo foi realizada com o auxílio de um equipamento denominado ISOMET 2104.

O ISOMET 2104 é um instrumento portátil para medição directa das propriedades térmicas de uma vasta gama de materiais. Está equipado com dois tipos de sondas: sondas de agulhas (para materiais porosos, fibrosos ou de fácil penetração da agulha) ou sondas de superfície (para materiais rígidos).

#### **3.4.1 Princípio de operação**

As medições realizadas pelo ISOMET 2104 estão baseadas na análise da temperatura de resposta do respectivo material a impulsos de propagação térmica. Esta propagação térmica resulta do aquecimento eléctrico proveniente de um resistor inserido na sonda que está em contacto com os materiais em estudo.

#### **3.4.2 Características das sondas**

O ISOMET 2104 permite a medição de diversos tipos de materiais, desde pedras rochosas a placas de poliestireno. Portanto, para se obter a maior eficácia de medição possível, distingue-se dois tipos de sondas:

- Sonda de agulhas – pode ser utilizada em materiais em que simplesmente se consiga penetrar a agulha ou que se consiga realizar um furo que permita a entrada desta. Para se poder utilizar esta sonda o material em questão terá de possuir uma espessura mínima entre 10 a 15 mm, e um comprimento mínimo de 80 mm. A agulha terá de ser inserida na sua totalidade, já que o sensor começa 15 mm antes da ponta da agulha e tem 50 mm de comprimento.
- Sondas de superfície – estas sondas estão feitas para serem usadas em materiais rígidos. Será necessário um mínimo de 60 mm de diâmetro da superfície do material e quanto mais plana for essa superfície mais eficaz será a medição do ISOMET 2104. A espessura mínima só poderá variar entre 10 a 15 mm.

- Temperatura de operação – para se conseguir retirar valores coerentes do ISOMET 2104, tem de se garantir que a temperatura ambiente não ultrapasse os 40°C.



**Figura 18 - Sondas utilizadas**

No quadro 2 será apresentado o alcance de medição das diversas sondas a utilizar, enquanto no quadro 3 a precisão de medição dessas mesmas sondas. Em relação ao quadro 4 exibe que tipo de sondas irão ser usadas para cada material.

#### **3.4.2.1 Alcance de medição das sondas a utilizar:**

**Quadro 2 - Alcance de medição das sondas**

<b>Nome</b>	<b>Condutibilidade térmica</b>	<b>Temperatura</b>
Sonda agulha API 210422	0.015-0.20 W/m.°C	-20°C - +70°C
Sonda superfície API 210411	0.04-0.30 W/m.°C	-15°C - +50°C
Sonda superfície API 210412	0.30-2.0 W/m.°C	-15°C - +50°C
Sonda superfície API 210413	2.0-6.0 W/m.°C	-15°C - +50°C

### **3.4.2.2 Precisão das sondas a utilizar:**

**Quadro 3 - Precisão de medição das sondas**

<b>Valores condutibilidade térmica</b>	<b>Precisão</b>
0.015-0.050 W/m.°C	5% valor de leitura + 0.003 W/m.°C
0.050-0.70 W/m.°C	5% valor de leitura + 0.001 W/m.°C
0.70-6.0 W/m.°C	10% valor de leitura

### **3.4.2.3 Sondas a utilizar nos provetes:**

**Quadro 4 - Sondas a utilizar nos provetes**

<b>Materiais</b>	<b>Sonda</b>
Lã mineral e XPS	Sonda agulha API 210422
Argamassas	Sonda superfície API 210411
Argila expandida, madeira, EPS, gesso cartonado e tijolo	Sonda superfície API 210411
Cerâmica de forra e Viroc	Sonda superfície API 210412
Betões 1,2 e 3	Sonda superfície API 210413
Pedras naturais	Sonda superfície API 210413

### **3.4.3 Factores que influenciam os resultados**

Tal como todos os aparelhos de medição de propriedades térmicas em materiais de construção, o ISOMET 2104 também pode ser influenciado pelas condições de medição, tais como:

- Qualidade do contacto entre a sonda e o material.
- Flutuações de temperatura ambiente.
- Não homogeneidade dos materiais.
- Anisotropia dos materiais.
- Humidade dos materiais.



**Figura 19 - Pormenor de utilização de uma placa de XPS de forma a garantir as condições de fronteira idênticas para todos os materiais**



## **4 - Resultados obtidos**

### **4.1 Método de análise dos resultados obtidos**

Os resultados obtidos são referentes ao ensaio de adsorção isotérmica e ao estudo da variação da condutibilidade térmica dos diversos materiais de construção ensaiados. A temperatura específica para este ensaio é de 23°C e os níveis de humidade relativa utilizados na câmara climática foram de 40%, 60%, 70%, 80%, 90% e 95%.

Os gráficos referentes à variação do teor de água apresentam como abcissa os valores de humidade relativa e como ordenada os respectivos valores de teor em água, ambos expressos em percentagem.

Enquanto os gráficos referentes à variação da condutibilidade térmica apresentam igualmente como abcissa os valores de humidade relativa (indicados em percentagem), mas como ordenada os respectivos valores de condutibilidade térmica, expressos em W/m°C.

Na análise da variação da condutibilidade térmica afigura-se mais um nível de humidade relativa (100%) que no teor em água, sendo este nível referente à situação de imersão dos provetes 7 dias em água. Assim, nesse nível de 100% os provetes são considerados como saturados.

Exibe-se ainda um terceiro gráfico que relaciona a variação do teor de água com a variação da condutibilidade térmica, sendo a abcissa representada pelo teor de água (em percentagem) e a ordenada pela condutibilidade térmica expressa em W/m°C. De notar que para as argamassas, neste terceiro gráfico, o estudo será realizado em grupos de 3 argamassas possuidoras do mesmo traço volumétrico, variando somente entre elas a relação água/ligante.

Optou-se por atribuir a mesma escala nos gráficos de cada grupo de 3 argamassas e no grupo dos betões, de forma a poder-se comparar com maior facilidade os resultados obtidos, uma vez que no caso das argamassas só varia a relação água/ligante nos grupos de 3 argamassas.

Os resultados obtidos vão ser analisados separadamente, consoante o tipo de material em questão. A análise vai incidir nas variações do teor em água, da condutibilidade térmica e na forma como estes parâmetros reagem ao aumento dos níveis de humidade relativa.

## 4.2 Argamassas

### Argamassa 1

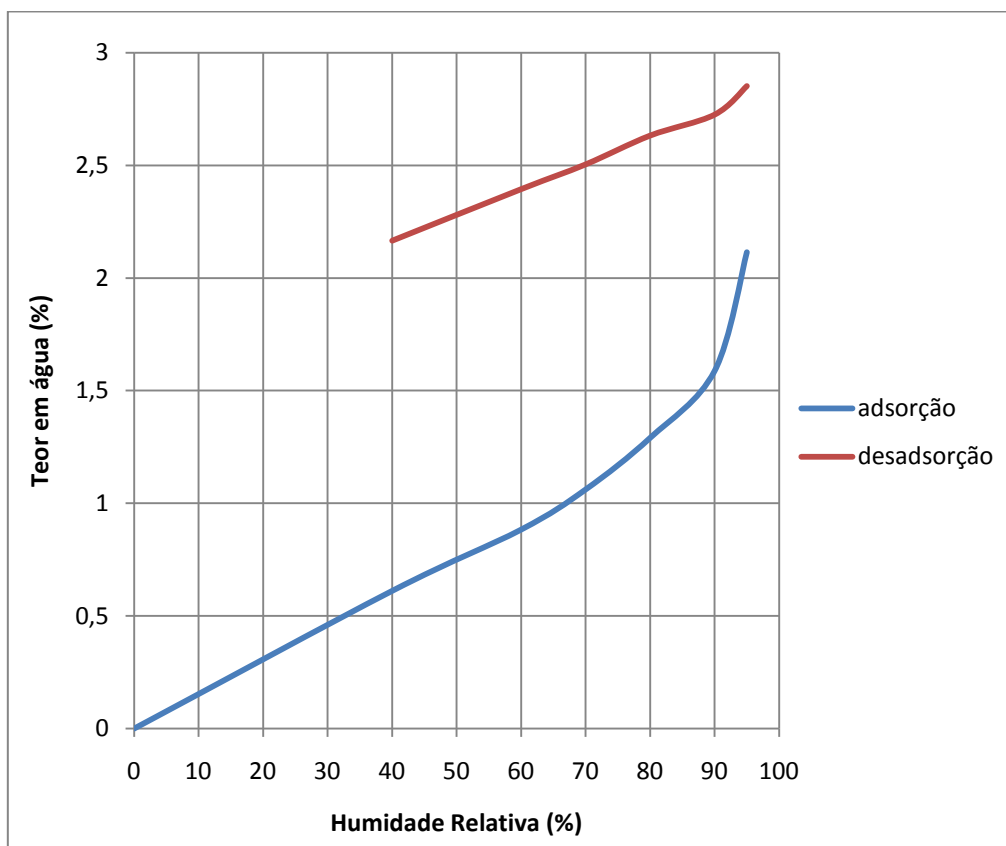


Gráfico 1 – Variação teor em água (argamassa 1)

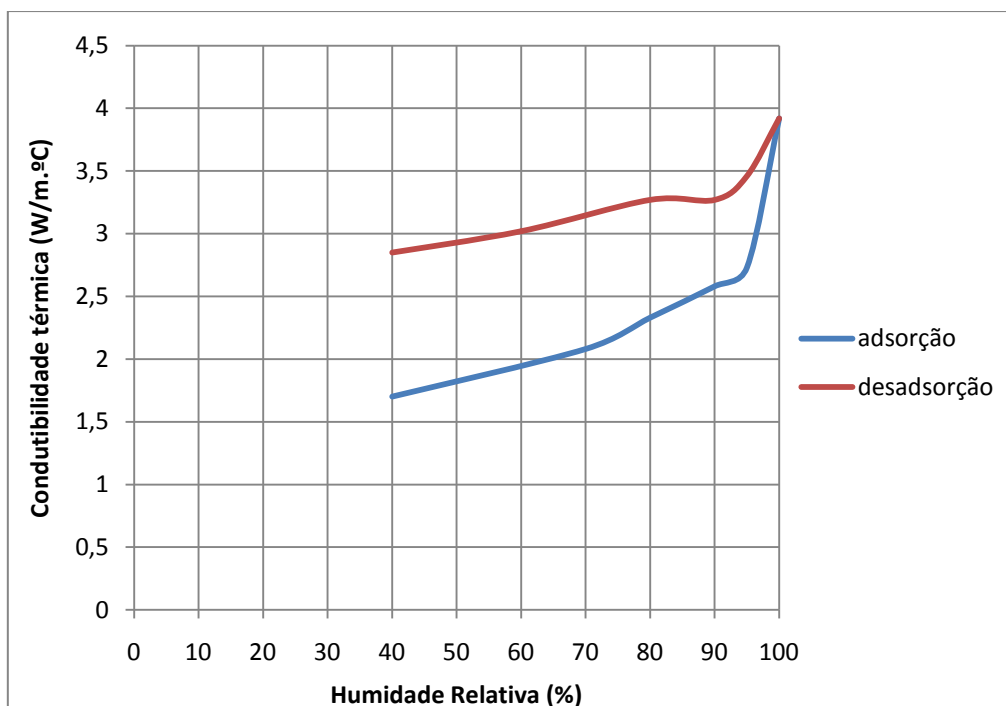


Gráfico 2 – Variação da condutibilidade térmica (argamassa 1)

## Argamassa 2

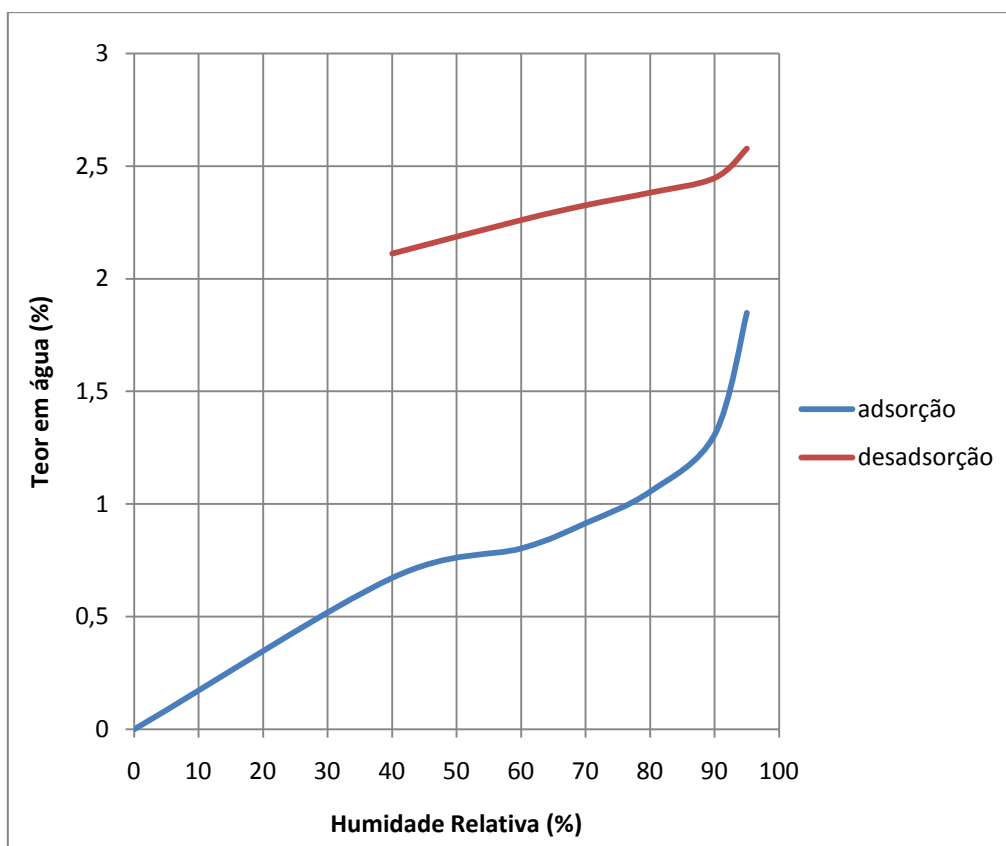


Gráfico 3 - Variação teor em água (argamassa 2)

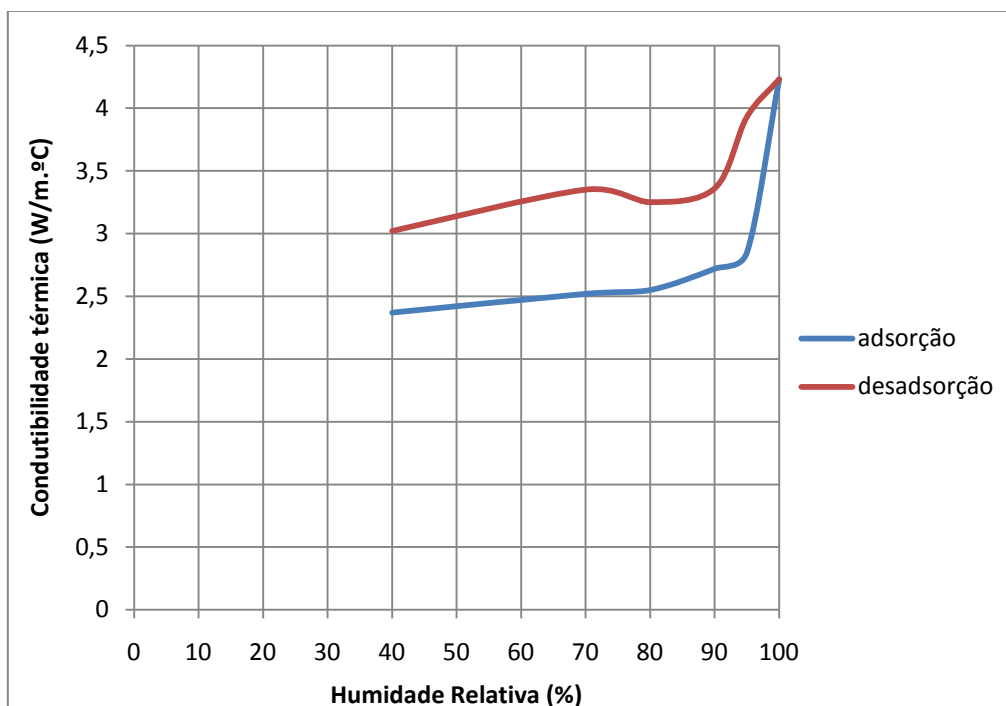


Gráfico 4 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 2)

### Argamassa 3

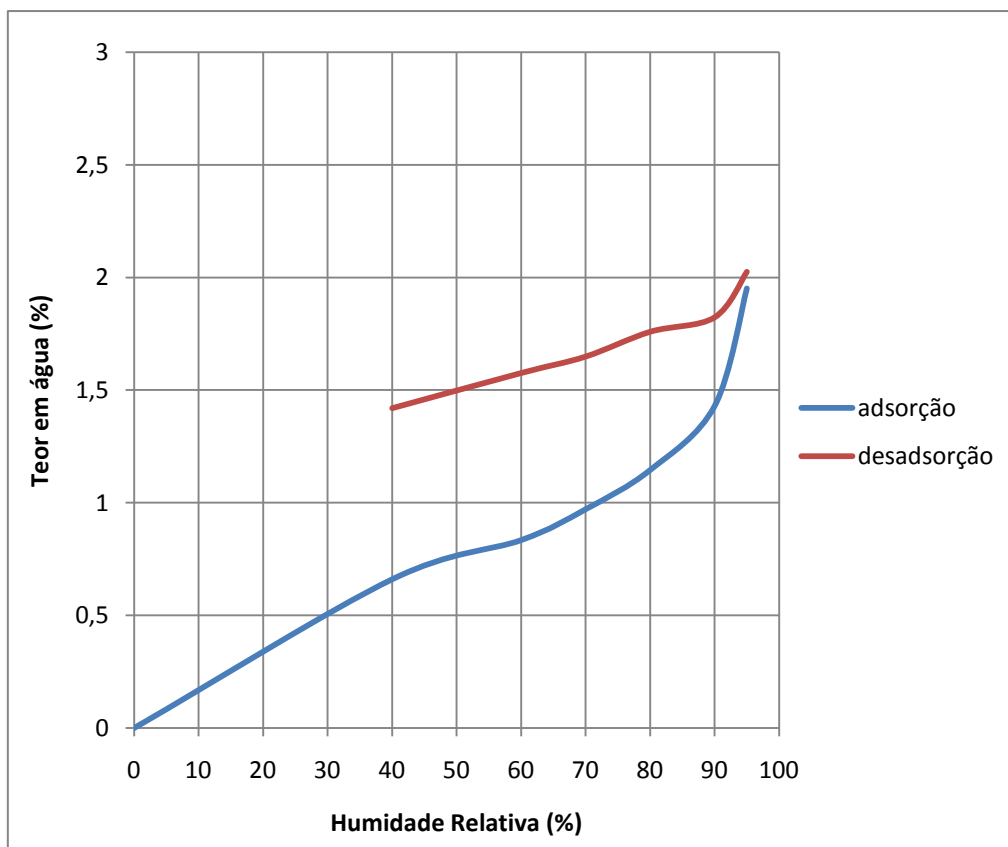


Gráfico 5 - Variação teor em água (argamassa 3)

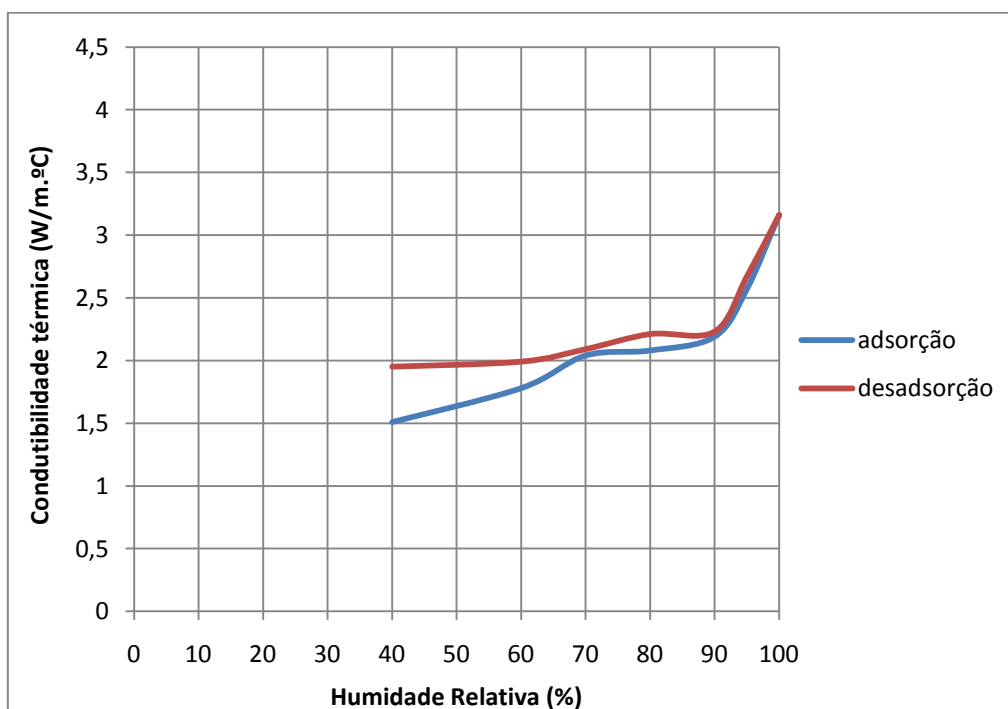


Gráfico 6 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 3)

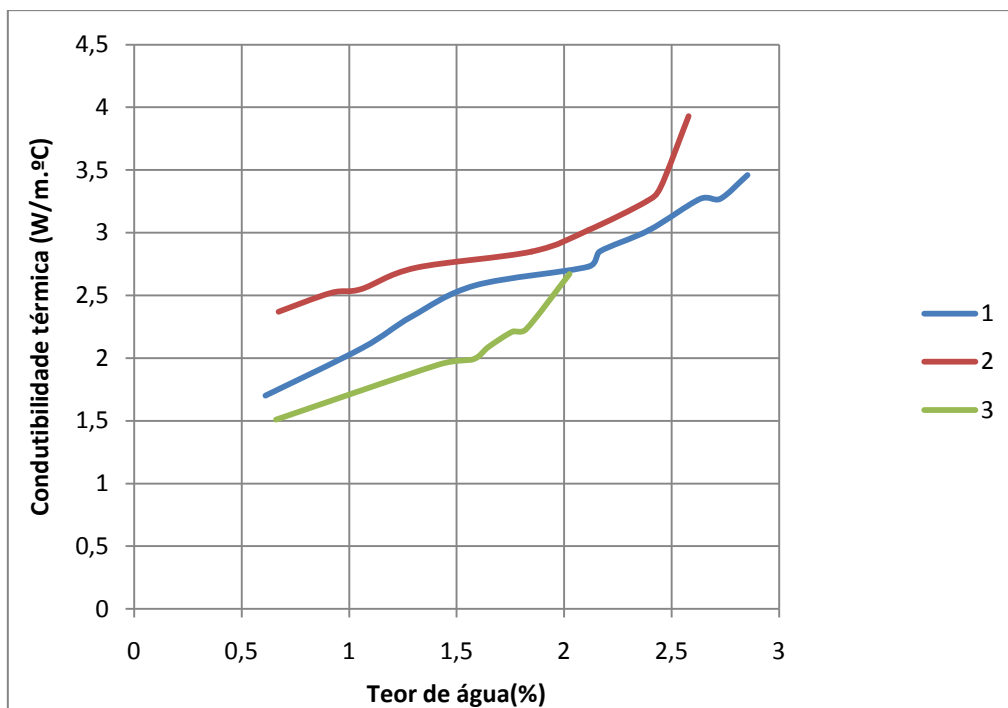


Gráfico 7 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (argamassa 1, 2 e 3)

#### 4.2.1 Argamassas 1, 2 e 3

Estas são as argamassas que contêm a maior percentagem de cimento de todas as que foram utilizadas.

Nos gráficos de variação do teor de água destas argamassas distinguem-se os maiores efeitos de histerese de todas as argamassas ensaiadas (em particular as argamassas 1 e 2, apresentando um efeito de histerese cerca de 1,5%), ocorrendo este fenómeno em todos os níveis de humidade relativa estudados, apesar de ser mais acentuado entre os níveis 40% a 90% de humidade relativa. Estas argamassas são as que mais adsorvem vapor de água, atingindo valores próximos de 3% de teor em água.

Em relação à variação da condutibilidade térmica é importante referir que são as argamassas que têm o maior valor de condutibilidade térmica apresentadas (sendo a argamassa 2 a de maior valor de todas as ensaiadas, com um valor de condutibilidade térmica do provete saturado de 4,23 W/m°C).

Através do gráfico que relaciona a condutibilidade térmica com o respectivo teor de água constata-se que estas argamassas apresentam um crescimento constante com o aumento do teor de água, chegando mesmo a quase duplicar de valor de condutibilidade térmica.

#### Argamassa 4

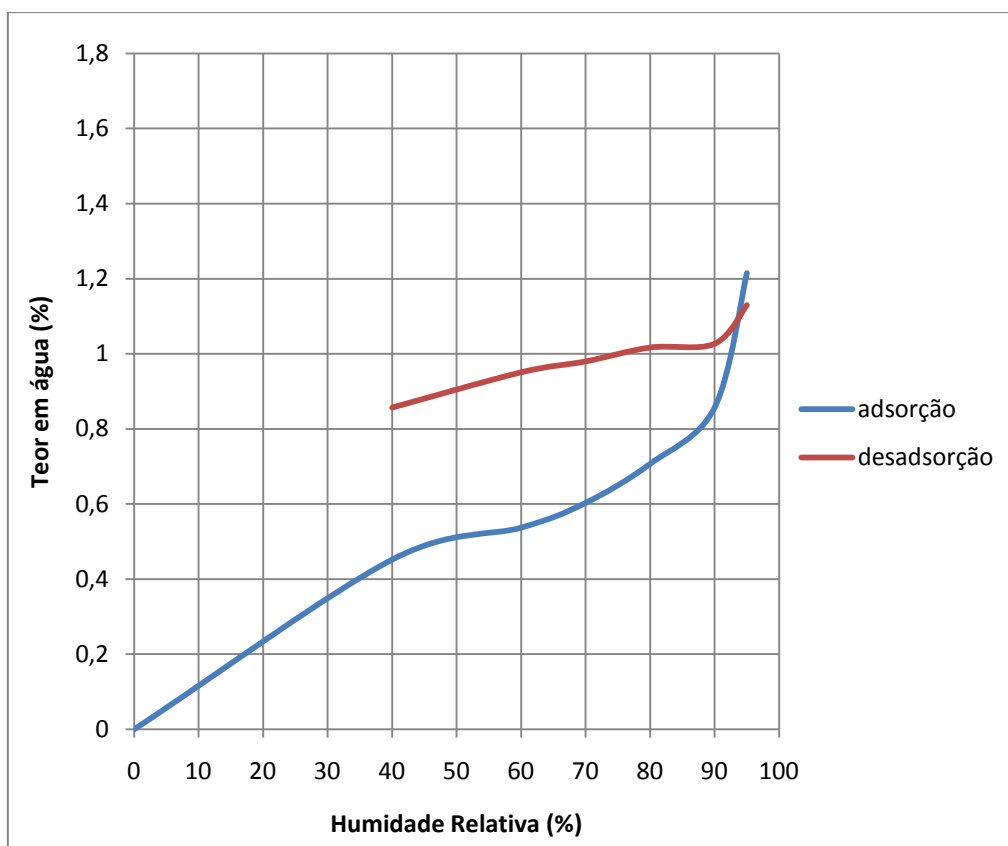


Gráfico 8 - Variação teor em água (argamassa 4)

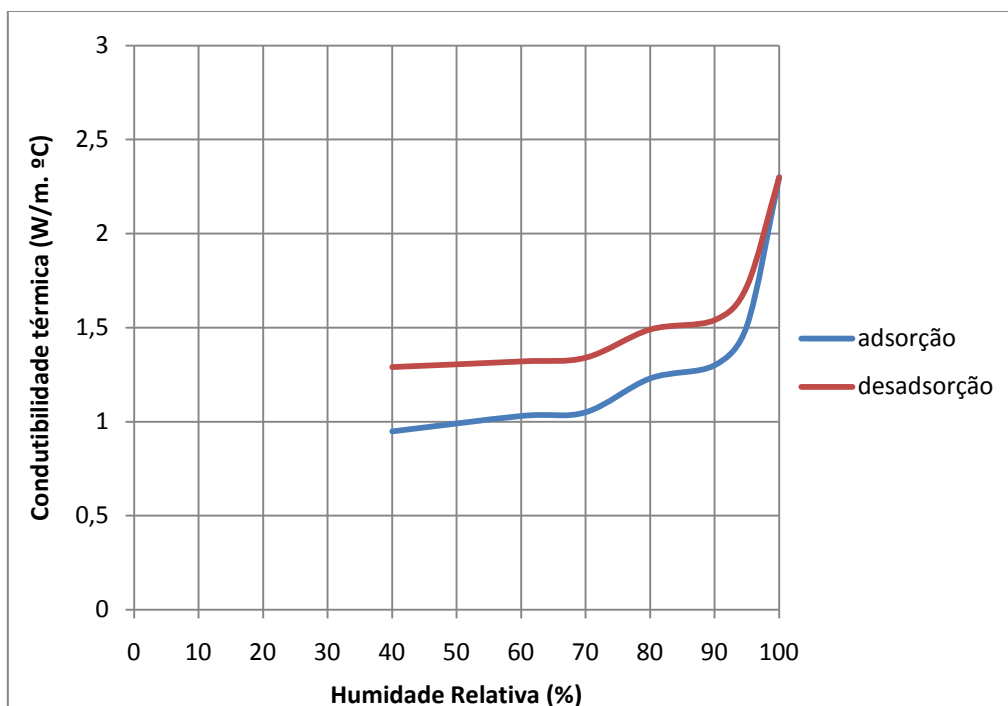


Gráfico 9 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 4)

## Argamassa 5

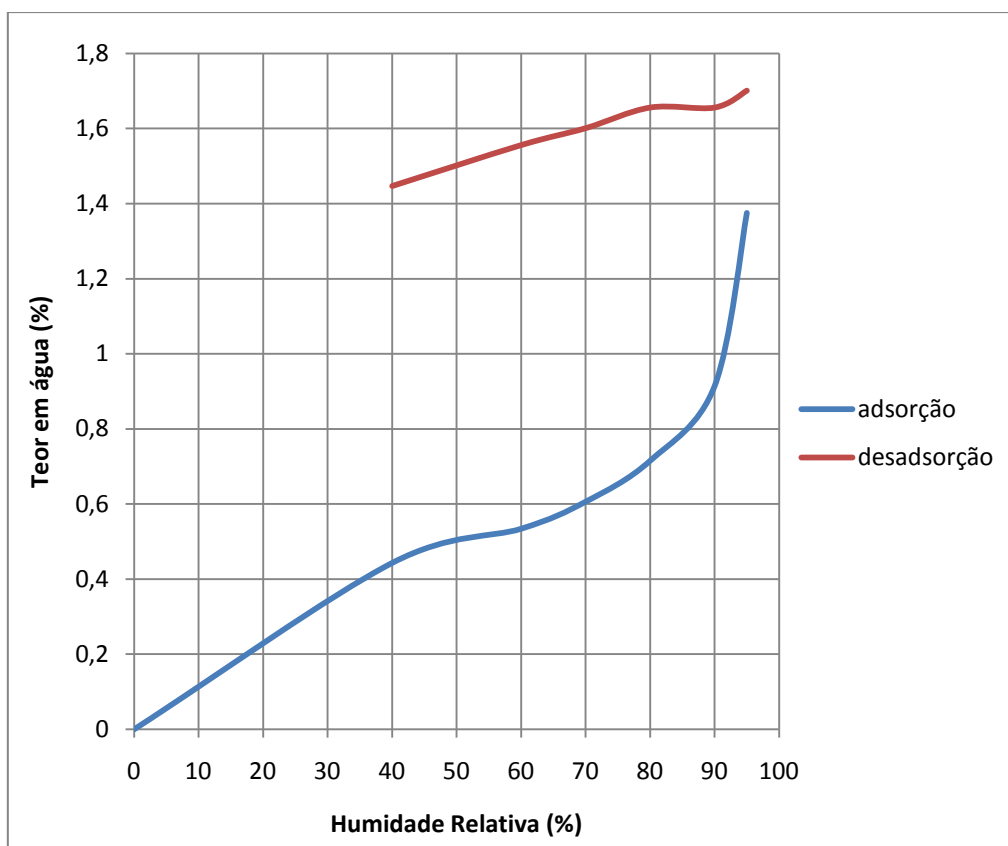


Gráfico 10 - Variação teor em água (argamassa 5)

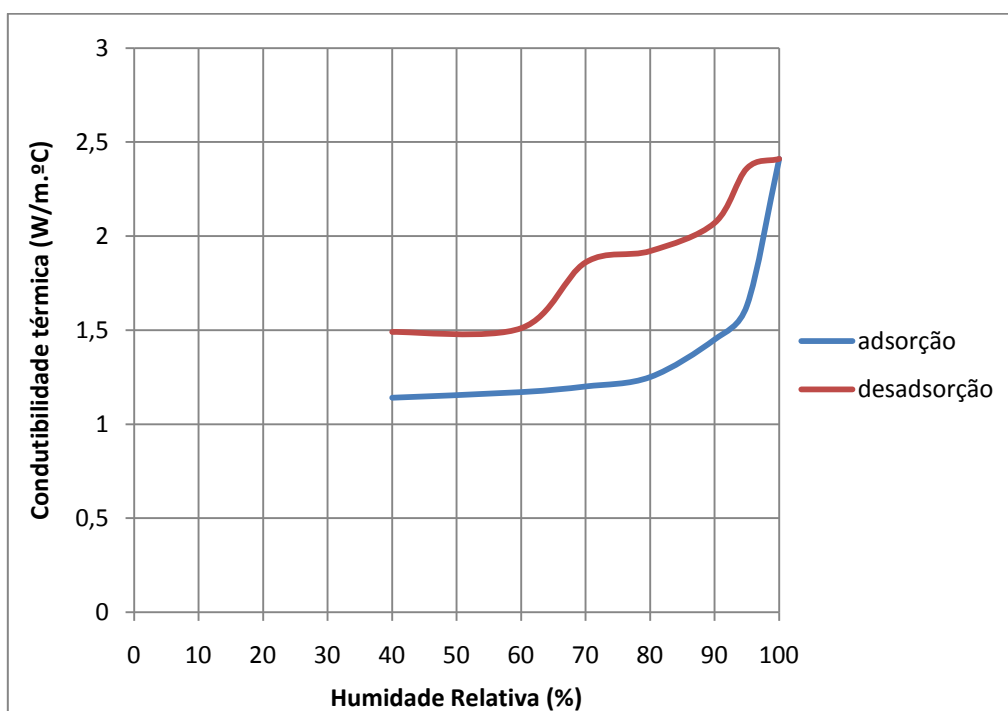


Gráfico 11 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 5)

## Argamassa 6

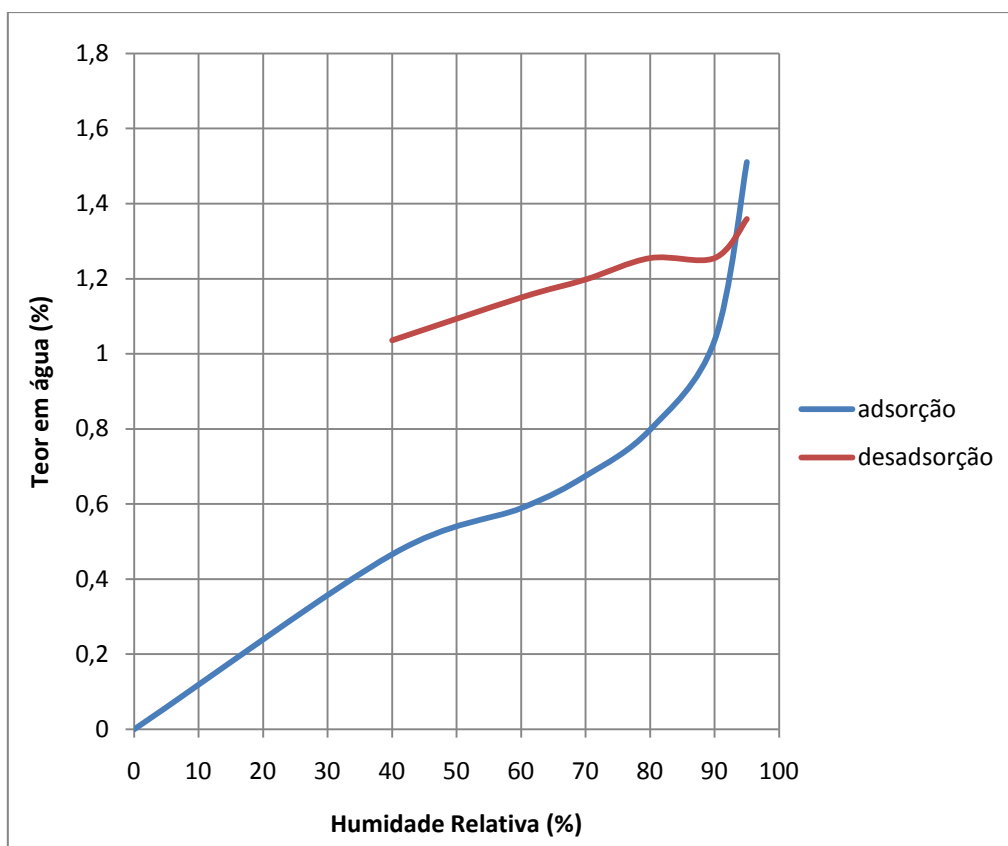


Gráfico 12 - Variação teor em água (argamassa 6)

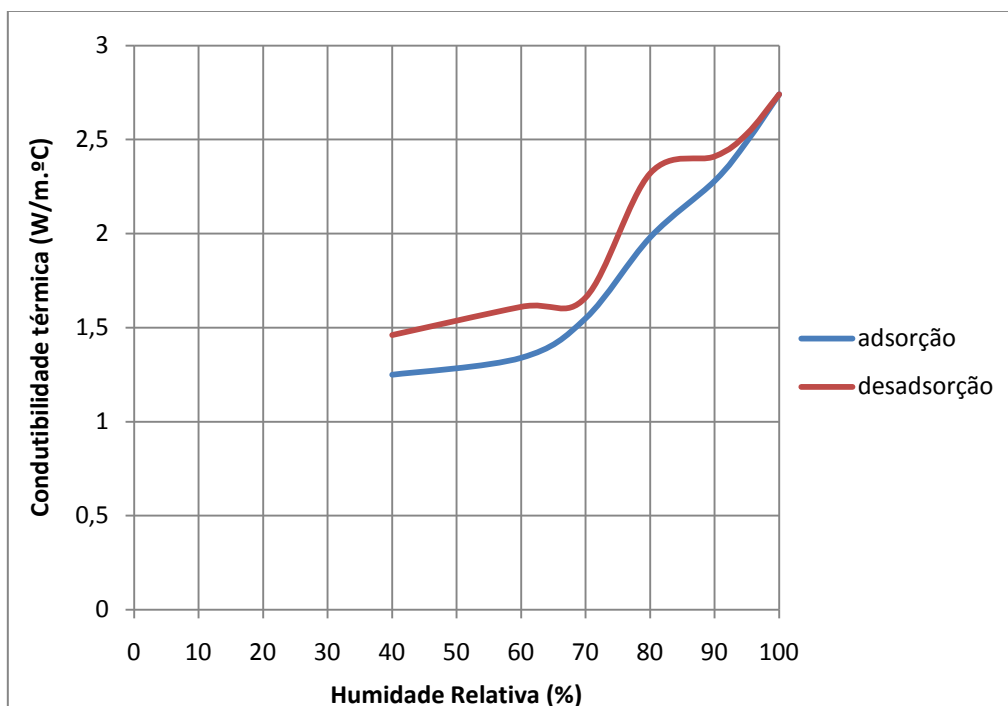


Gráfico 13 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 6)



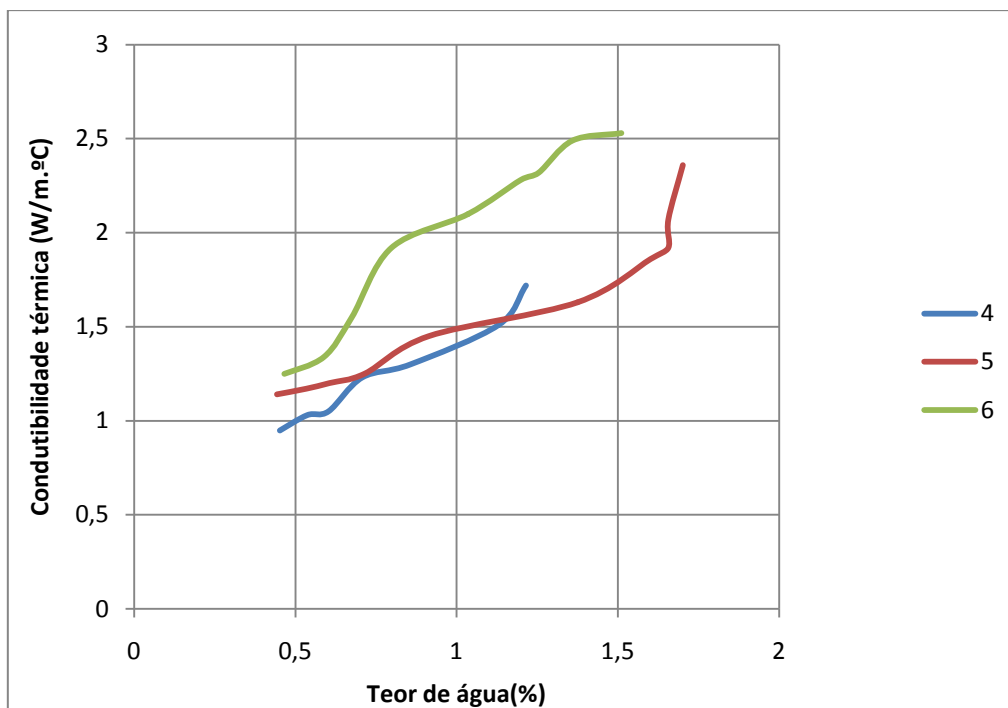


Gráfico 14 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (argamassa 4, 5 e 6)

#### 4.2.2 Argamassas 4, 5 e 6

Este é o grupo das argamassas que apresenta a segunda maior percentagem de cimento de todas as que foram utilizadas, contendo um volume similar (não igual) ao volume de água.

Nos gráficos que apresentam a variação do teor em água distinguem-se efeitos de histerese significativos (em particular a argamassa 5, apresentando uma variação cerca de 1,0%), ocorrendo novamente este fenómeno em todos os níveis de humidade relativa, apesar de ser mais acentuado entre os 40% a 90%. Verifica-se que adsorvem menos vapor de água que as argamassas anteriores, registando valores máximos de teor em água cerca de 1,5%.

Neste grupo os valores de condutibilidade térmica são menores que no grupo das argamassas anteriores. Constatando-se ainda que o valor da condutibilidade térmica da argamassa 6 é mais influenciada pelo teor de água que as argamassas 4 e 5.

## Argamassa 7

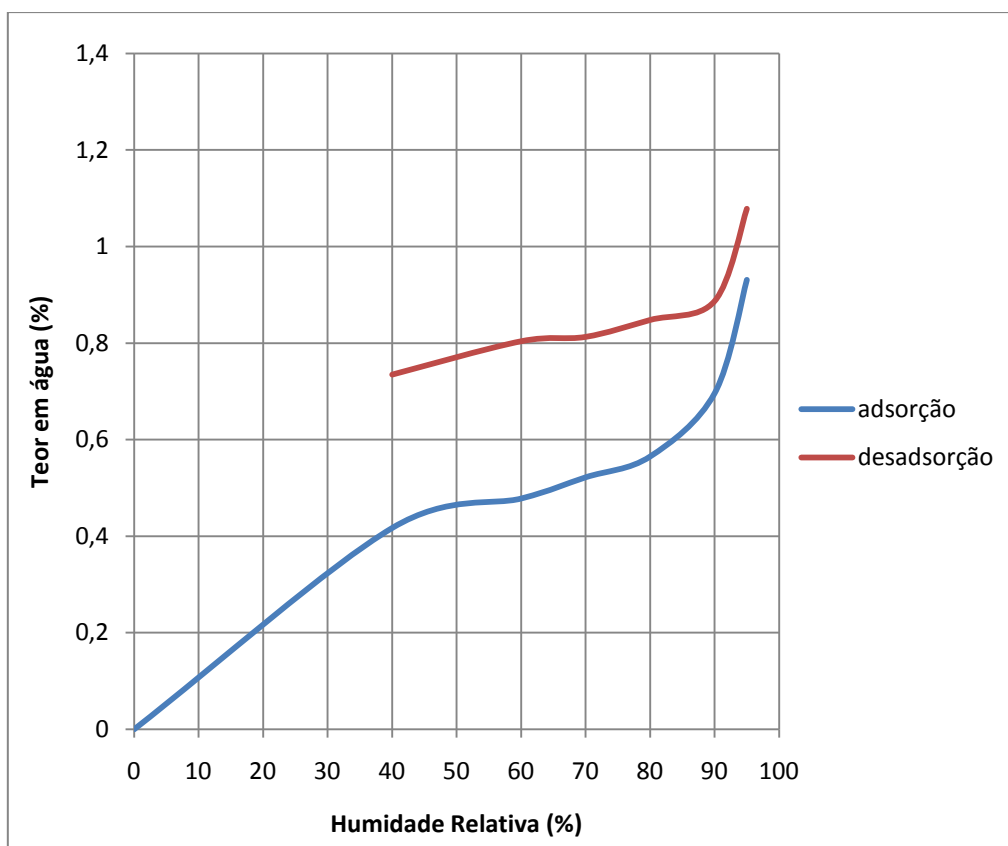


Gráfico 15 - Variação teor em água (argamassa 7)

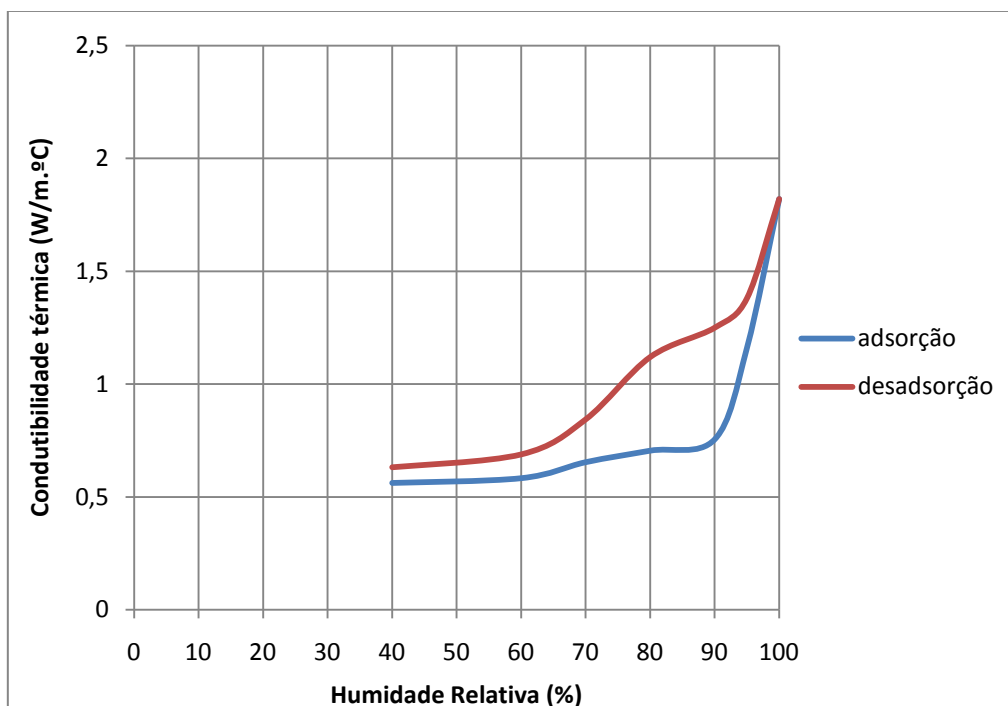


Gráfico 16 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 7)

## Argamassa 8

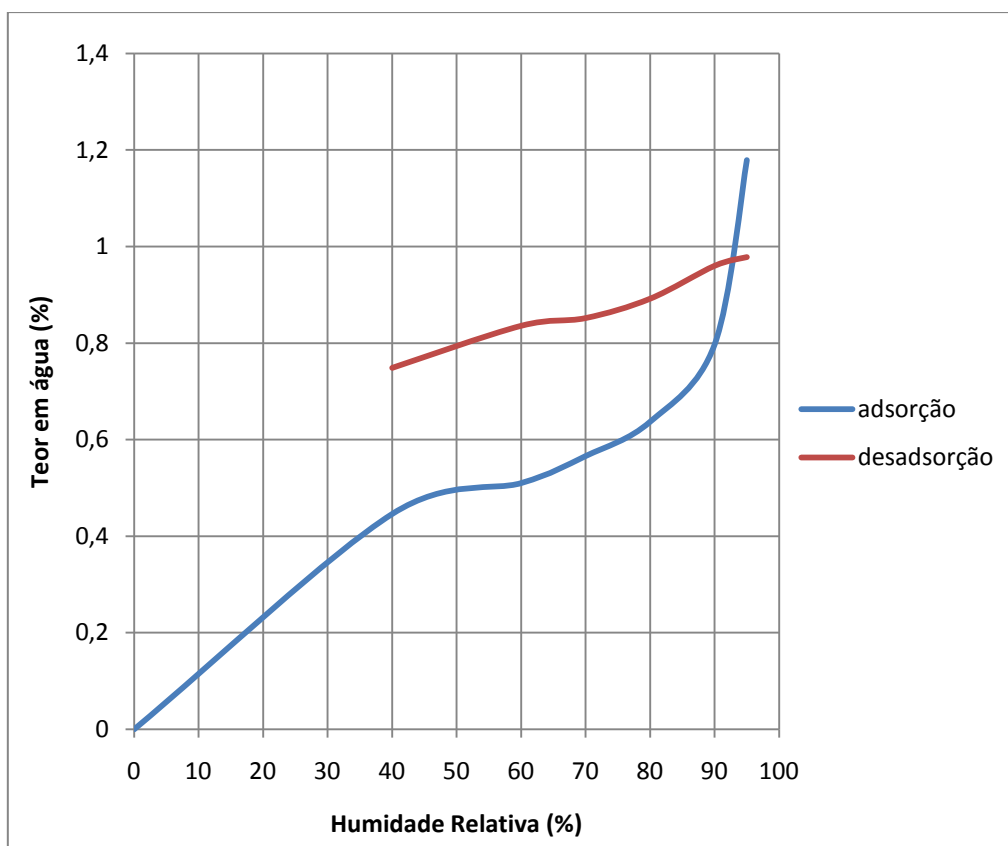


Gráfico 17 - Variação teor em água (argamassa 8)

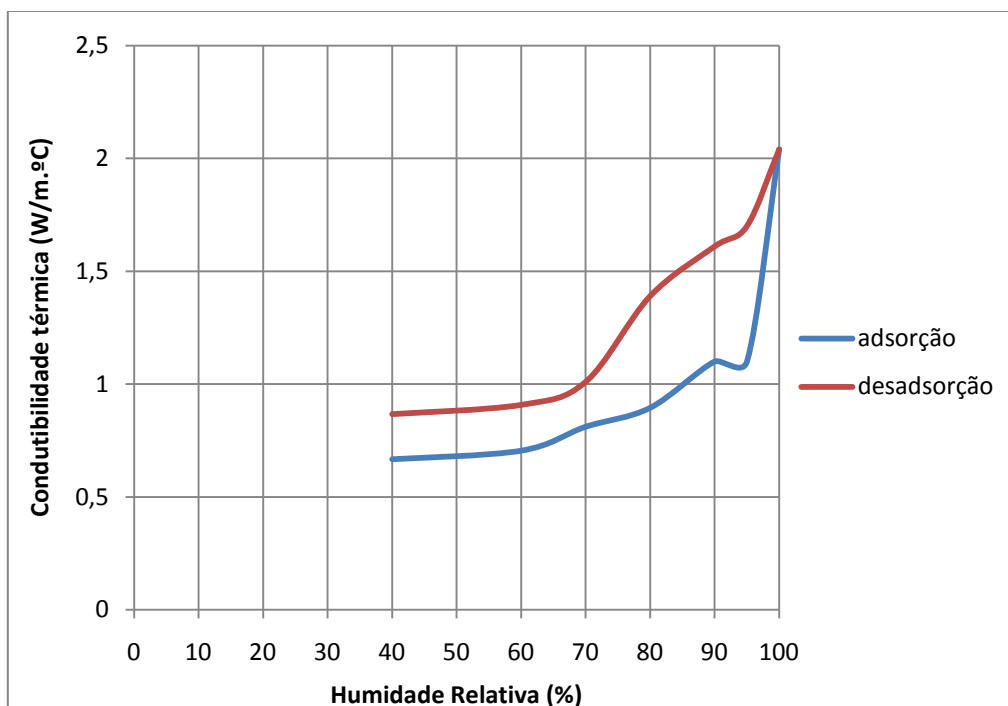


Gráfico 18 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 8)

## Argamassa 9

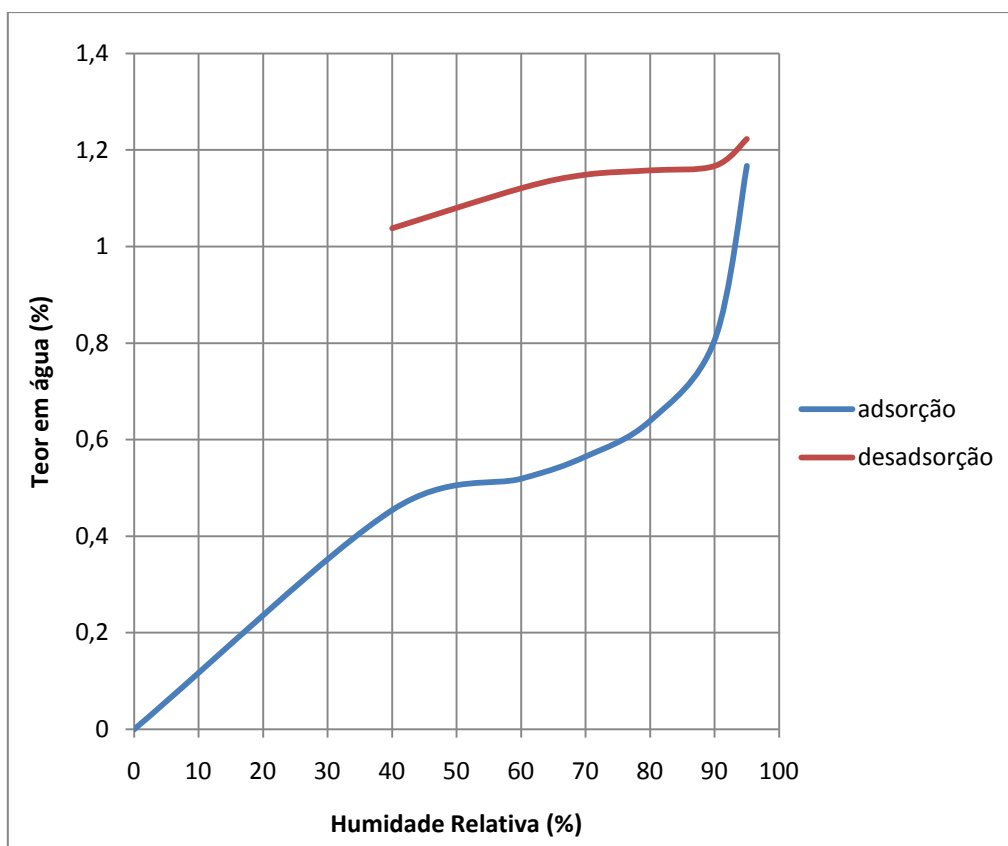


Gráfico 19 – Variação teor em água (argamassa 9)

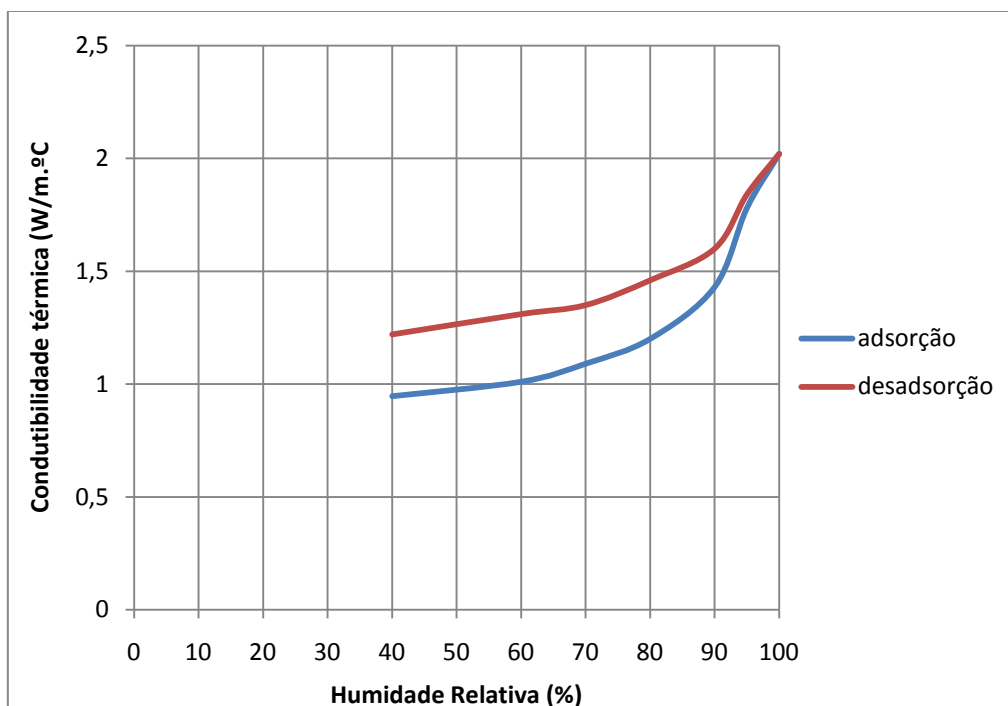


Gráfico 20 – Variação da condutibilidade térmica (argamassa 9)

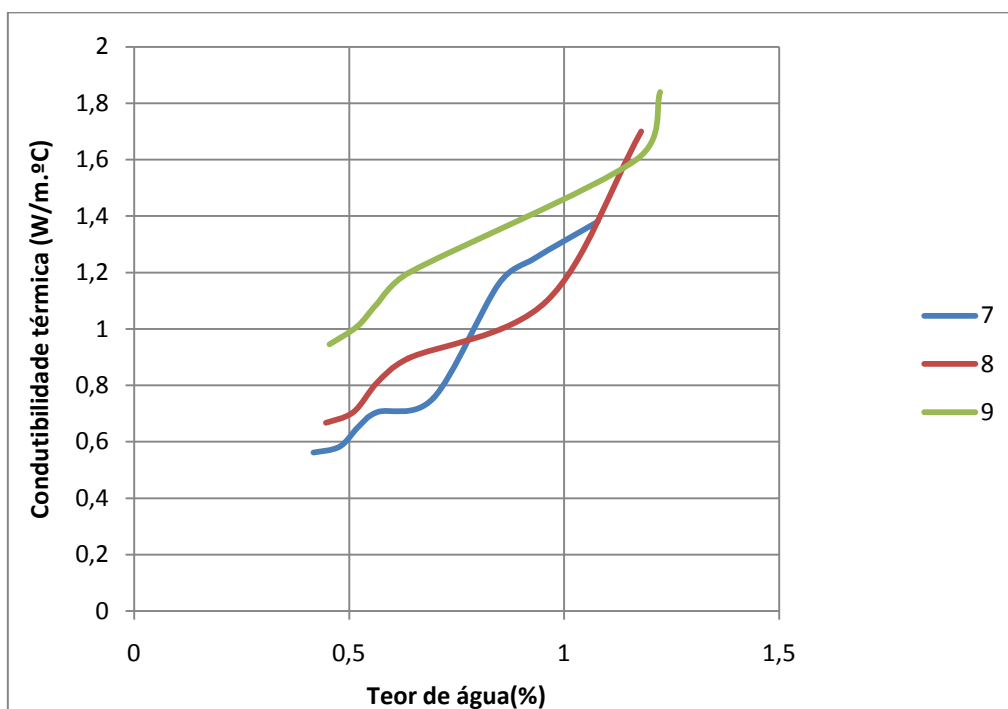


Gráfico 21 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (argamassa 7, 8 e 9)

#### 4.2.3 Argamassas 7, 8 e 9

Constituem dentro do grupo das argamassas de cimento, as que possuem a menor percentagem de cimento.

Neste grupo apesar de se registar efeito de histerese na variação do teor de água, verifica-se uma redução acentuada deste mesmo efeito em relação às argamassas com maior percentagem de cimento. Nota-se ainda que adsorvem menos vapor de água que as argamassas anteriores, atingindo valores máximos de teor em água de cerca de 1,2%.

Em relação aos valores de condutibilidade térmica registados podemos constatar que são bastante inferiores às primeiras argamassas analisadas (com maior percentagem de cimento), sendo que a partir do nível 90% de humidade relativa estes valores de condutibilidade têm um crescimento bastante acentuado.

Por outro lado, verifica-se que estas argamassas apesar de adsorverem pouco vapor de água são significativamente afectadas pelo aumento do teor de água, já que a respectiva condutibilidade térmica aumenta significativamente para todas elas.

## Argamassa 10

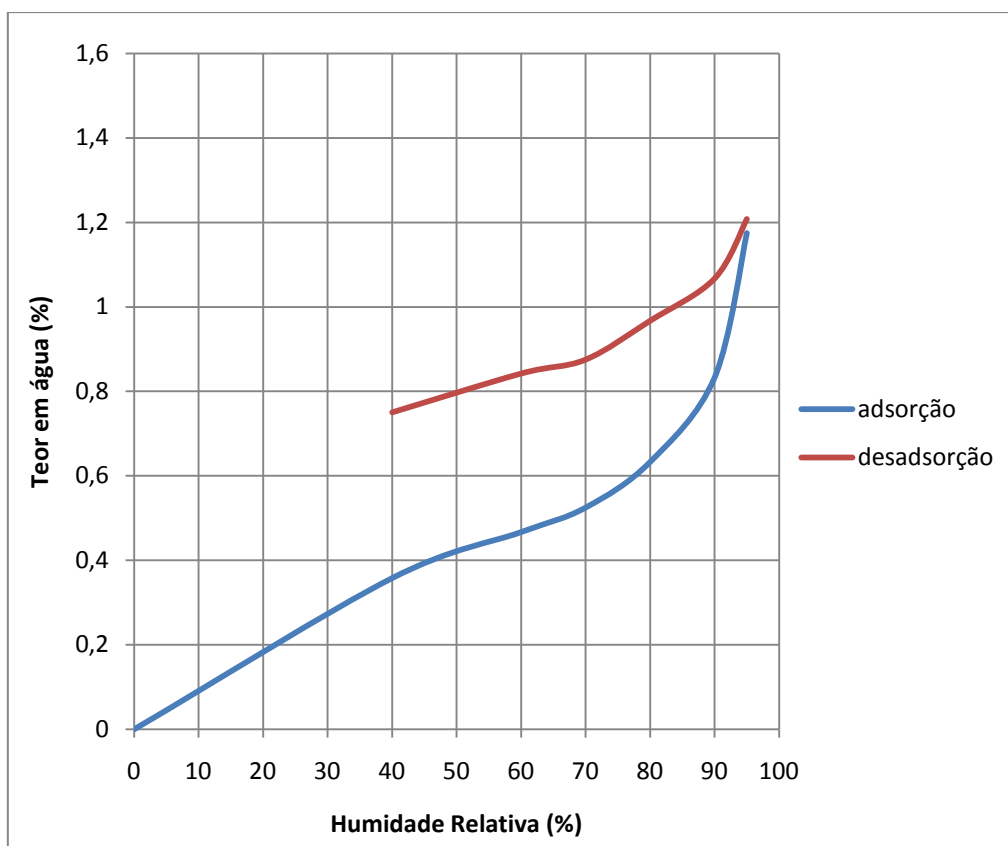


Gráfico 22 – Variação teor em água (argamassa 10)

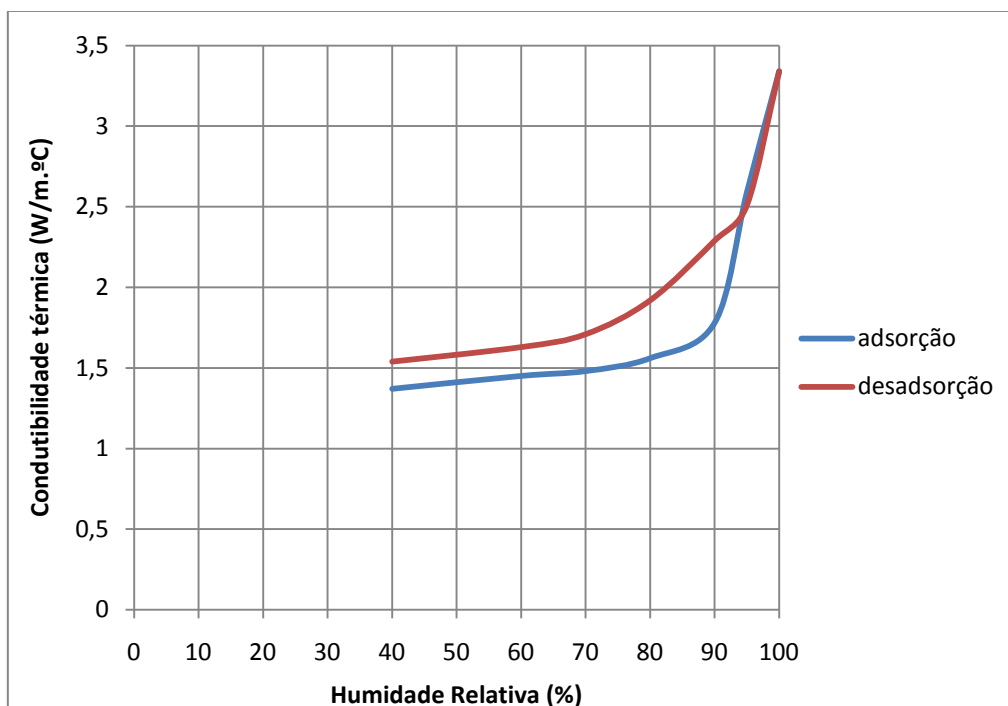


Gráfico 23 – Variação da condutibilidade térmica (argamassa 10)

## Argamassa 11

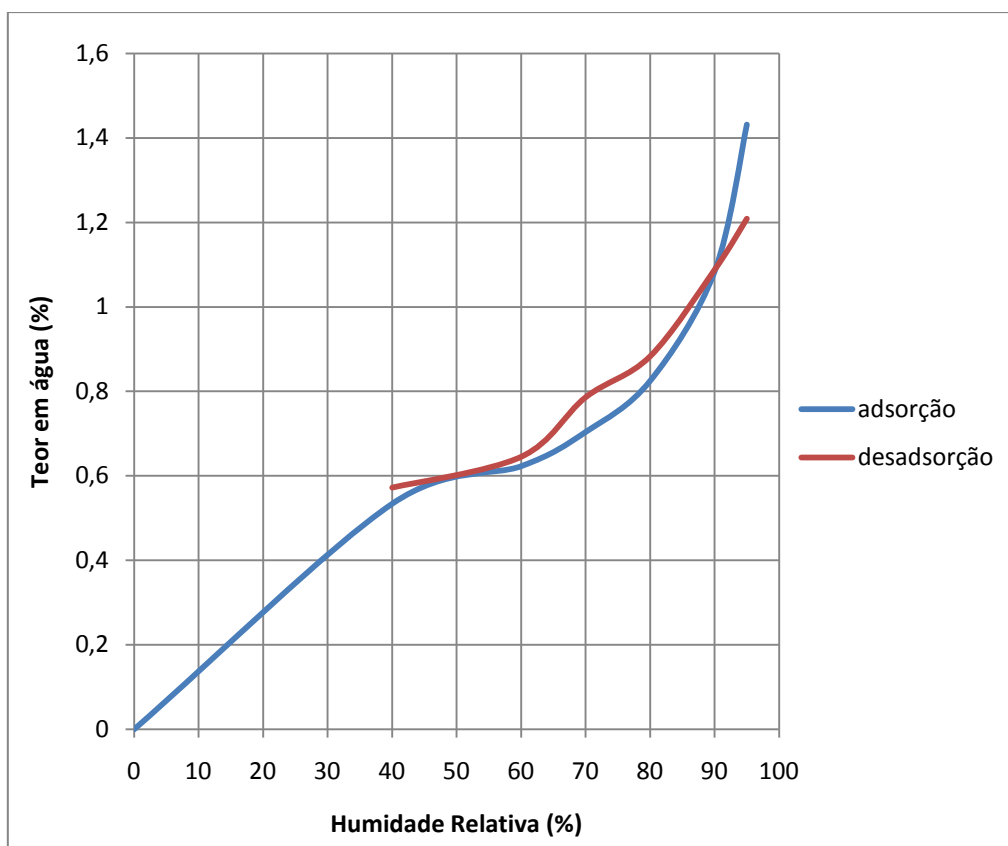


Gráfico 24 – Variação teor em água (argamassa 11)

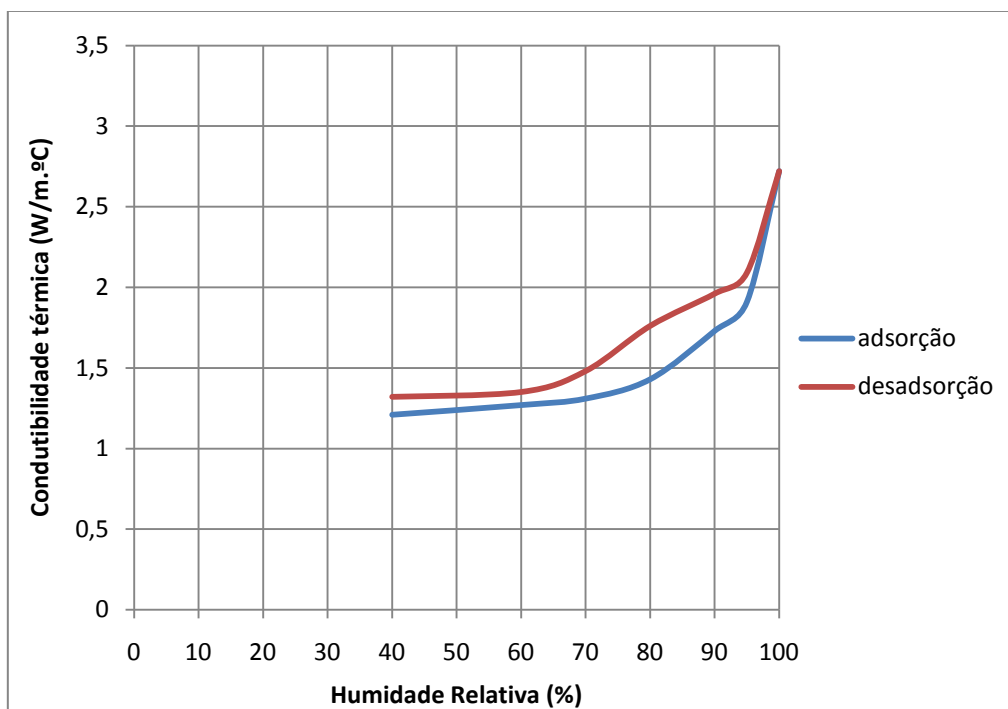


Gráfico 25 – Variação da condutibilidade térmica (argamassa 11)

## Argamassa 12

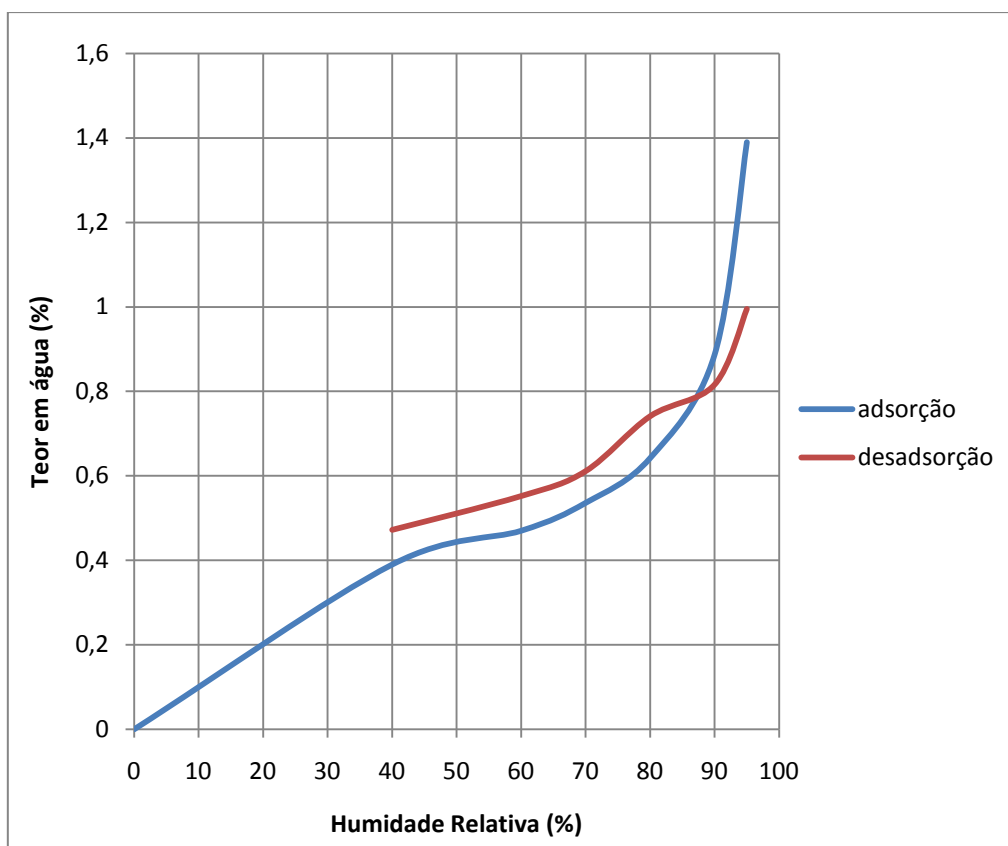


Gráfico 26 - Variação teor em água (argamassa 12)

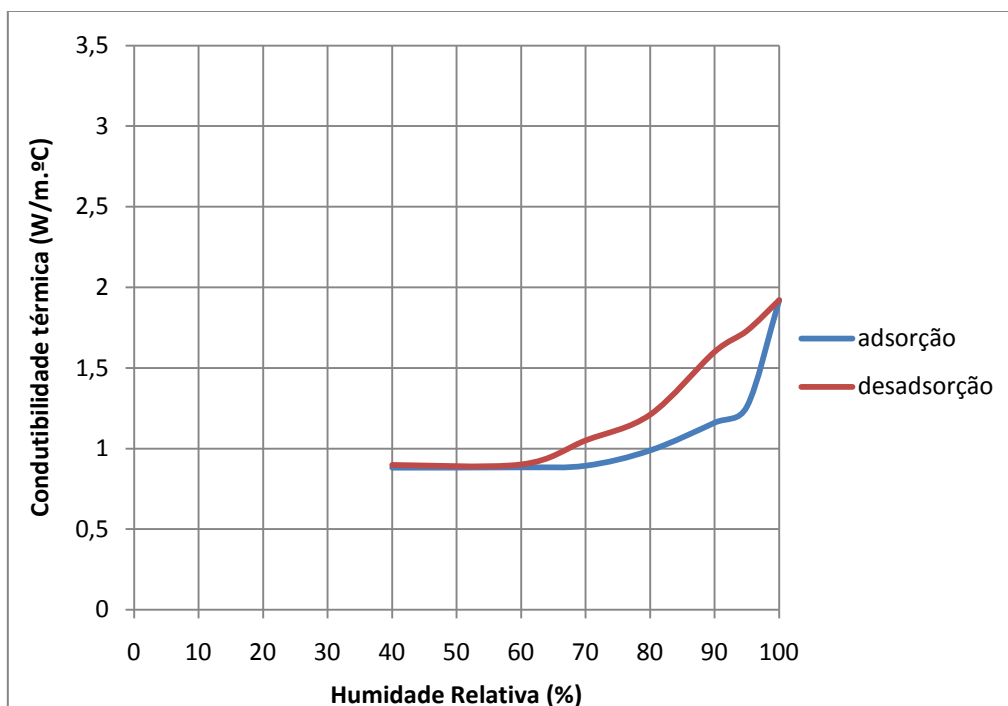


Gráfico 27 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 12)



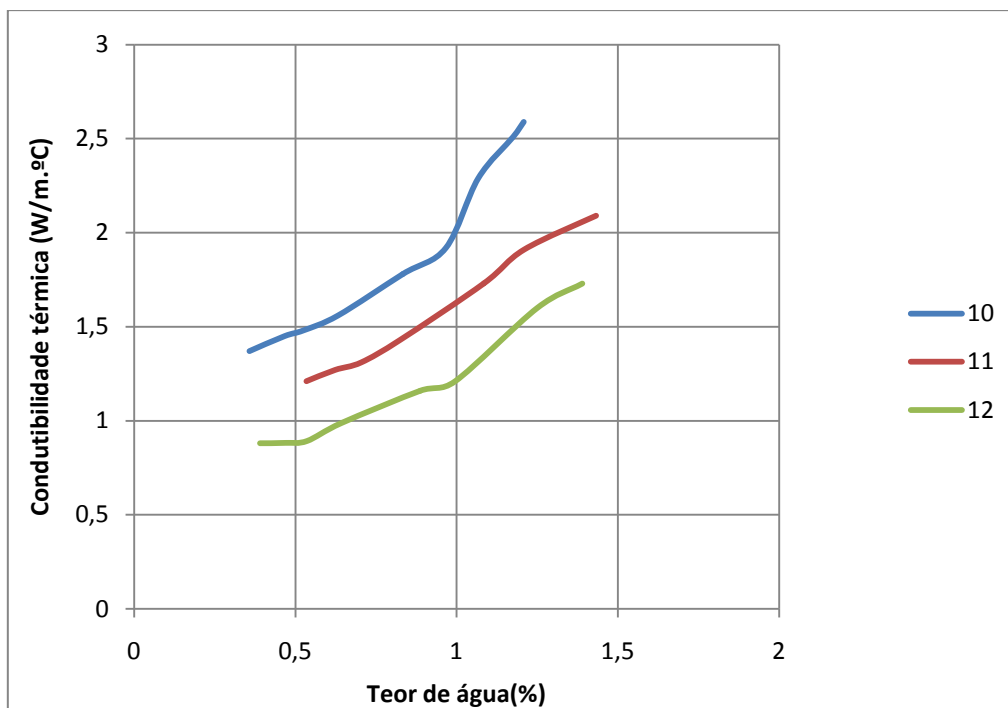


Gráfico 28 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água  
(argamassa 12, 13 e 14)

#### 4.2.4 Argamassas 10, 11 e 12

Estas integram o grupo das argamassas bastardas que apresenta uma percentagem de cimento igual à de cal. Dentro do grupo das bastardas estas são as que contêm maior percentagem de cimento.

Apesar do efeito de histerese verificado nos gráficos de variação do teor de água ser pouco acentuado (com excepção da argamassa 10), dentro da gama das argamassas bastardas são as únicas que registam efeito de histerese, atingindo valores de adsorção de vapor de água de cerca de 1,4%.

Na avaliação da condutibilidade térmica de todas as argamassas bastardas a que apresenta o valor mais elevado é a argamassa 10 (com um valor de condutibilidade térmica do provete saturado de 3,34 W/m°C).

Em relação à influência do teor de água verifica-se que o aumento deste provoca um crescimento relativamente constante da condutibilidade térmica. Constatando-se ainda que quanto maior for a relação A/L, menor será o valor de condutibilidade térmica.

### Argamassa 13

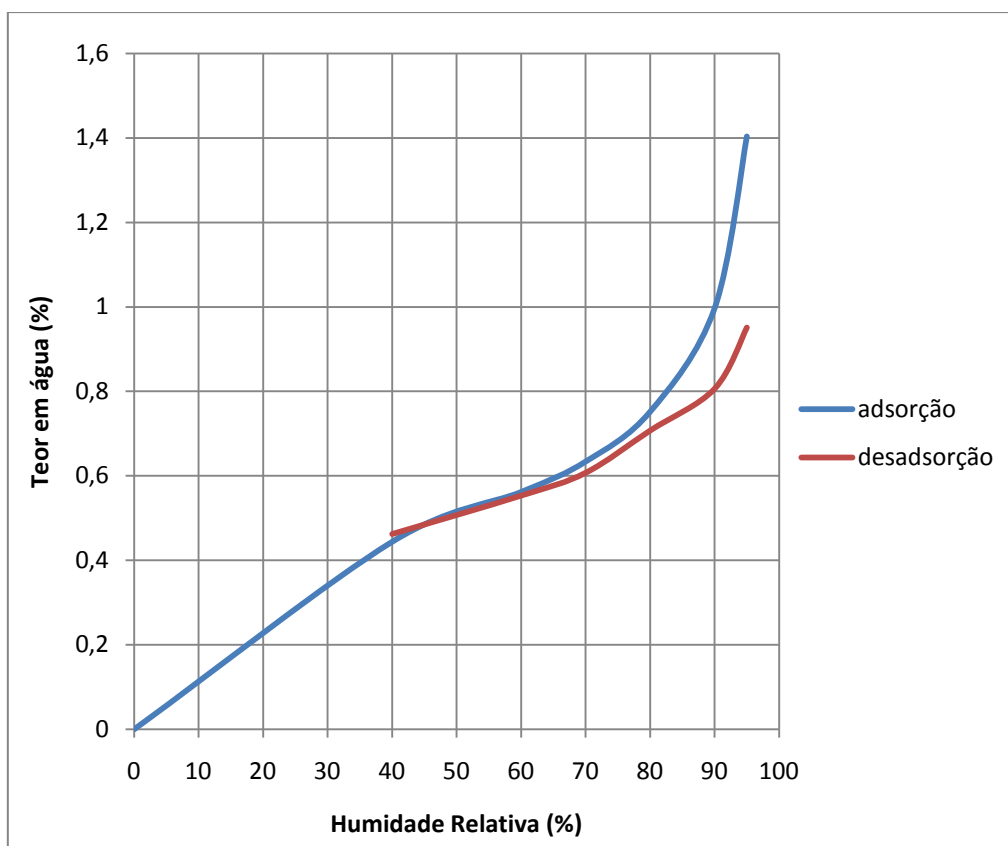


Gráfico 29 - Variação teor em água (argamassa 13)

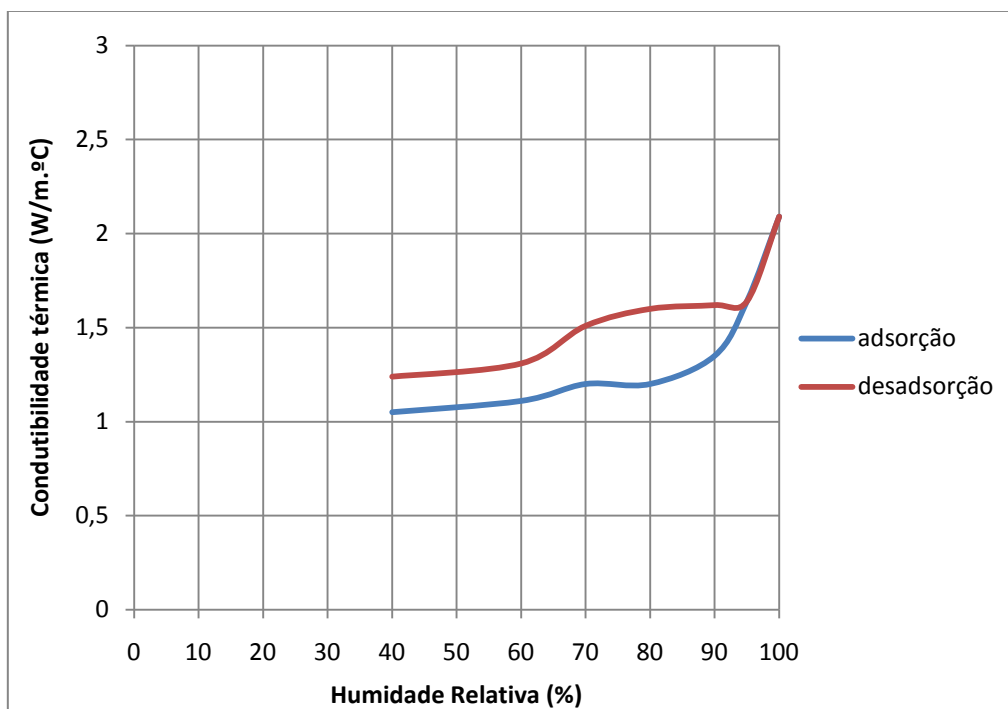


Gráfico 30 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 13)

## Argamassa 14

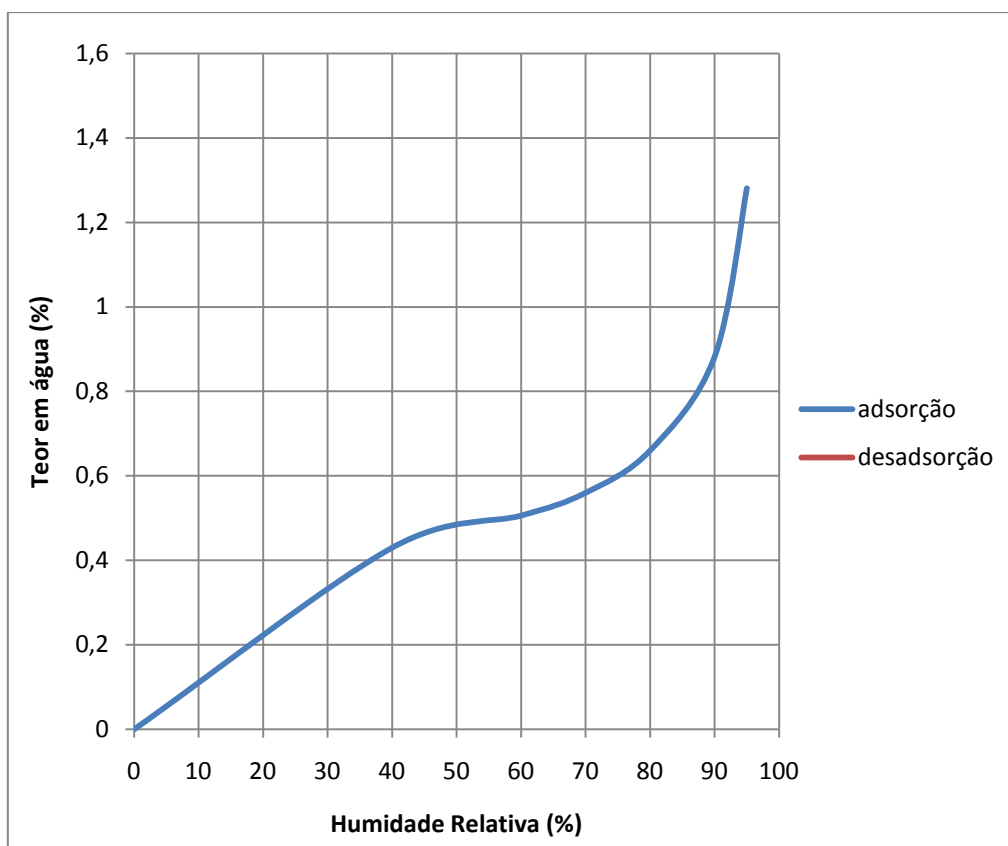


Gráfico 31 - Variação teor em água (argamassa 14)

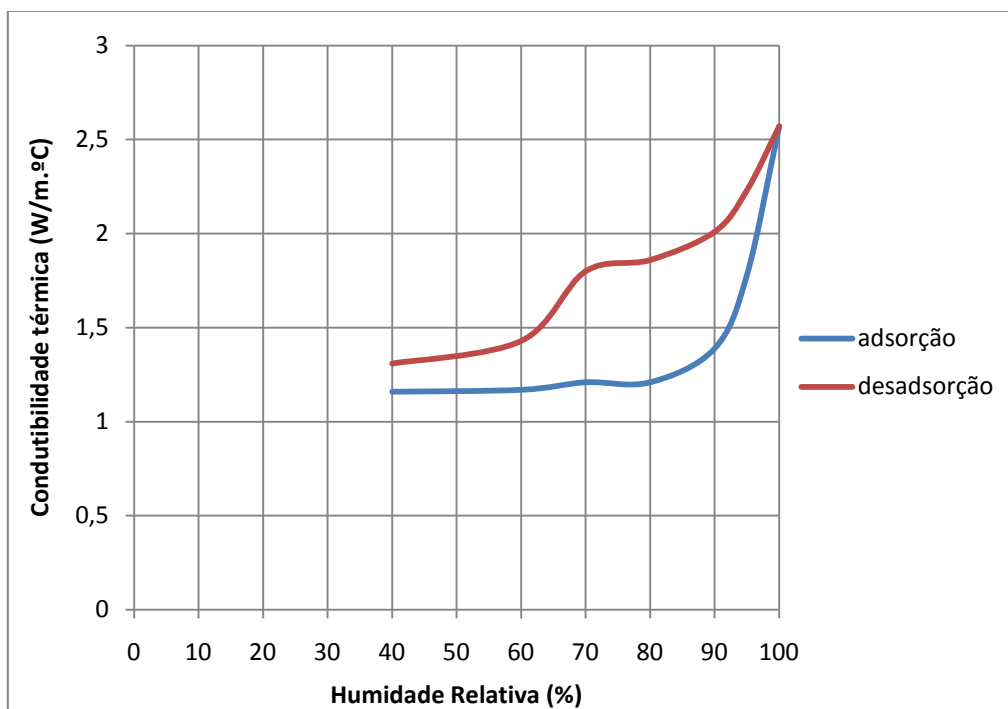


Gráfico 32 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 14)

## Argamassa 15

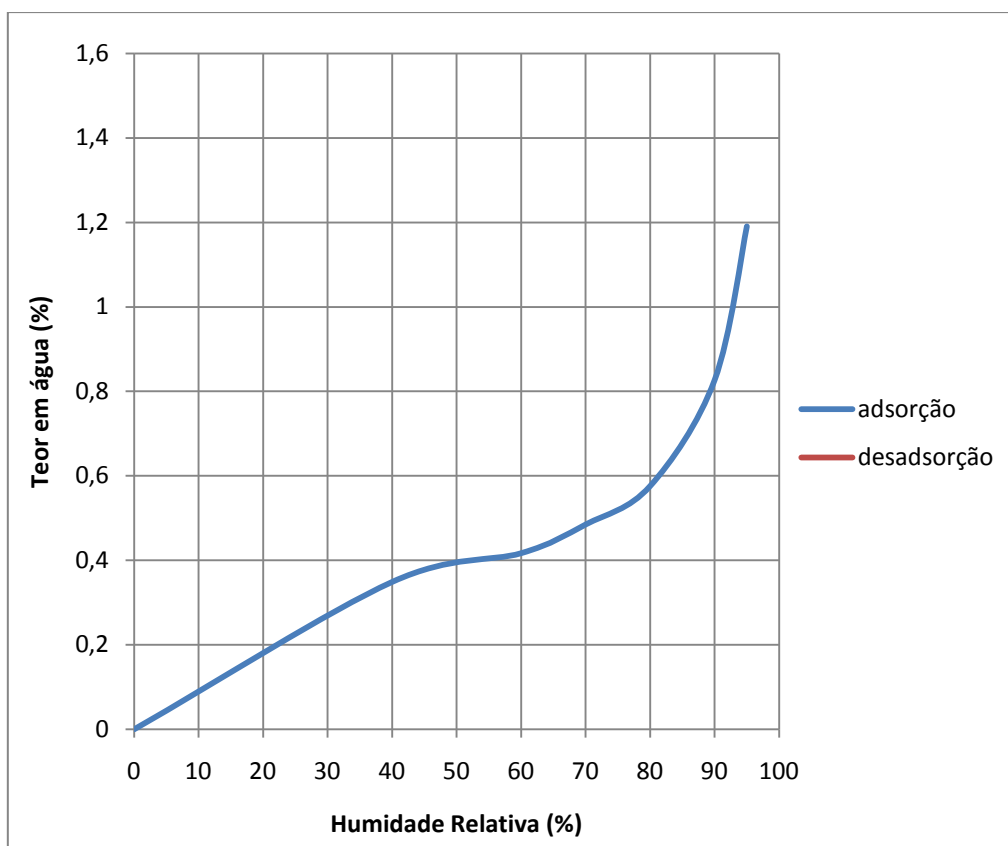


Gráfico 33 - Variação teor em água (argamassa 15)

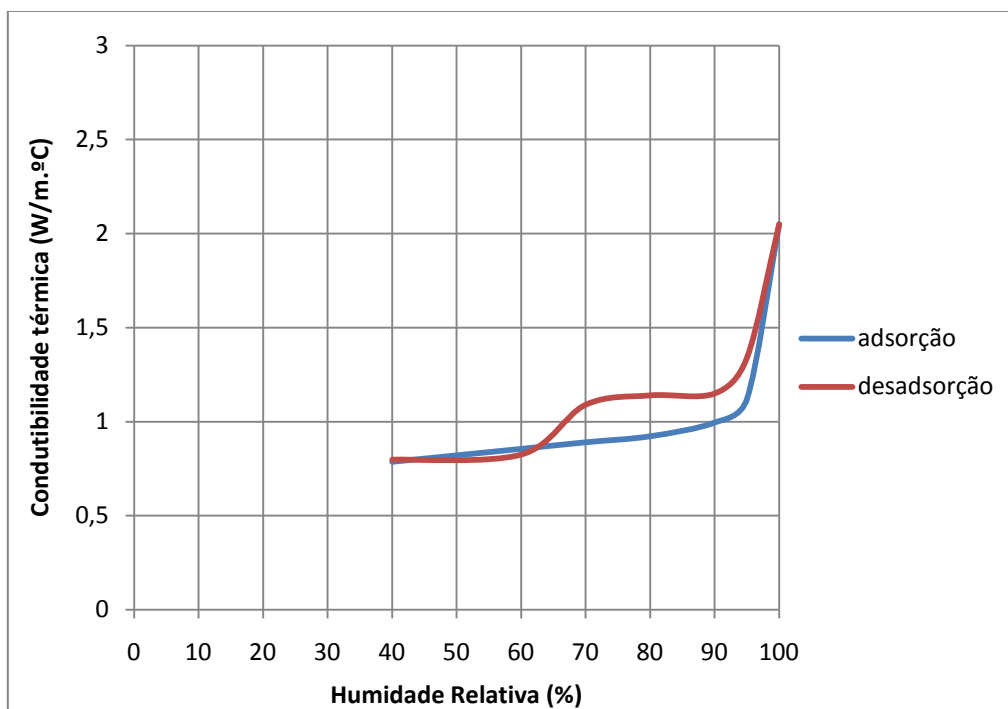


Gráfico 34 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 15)

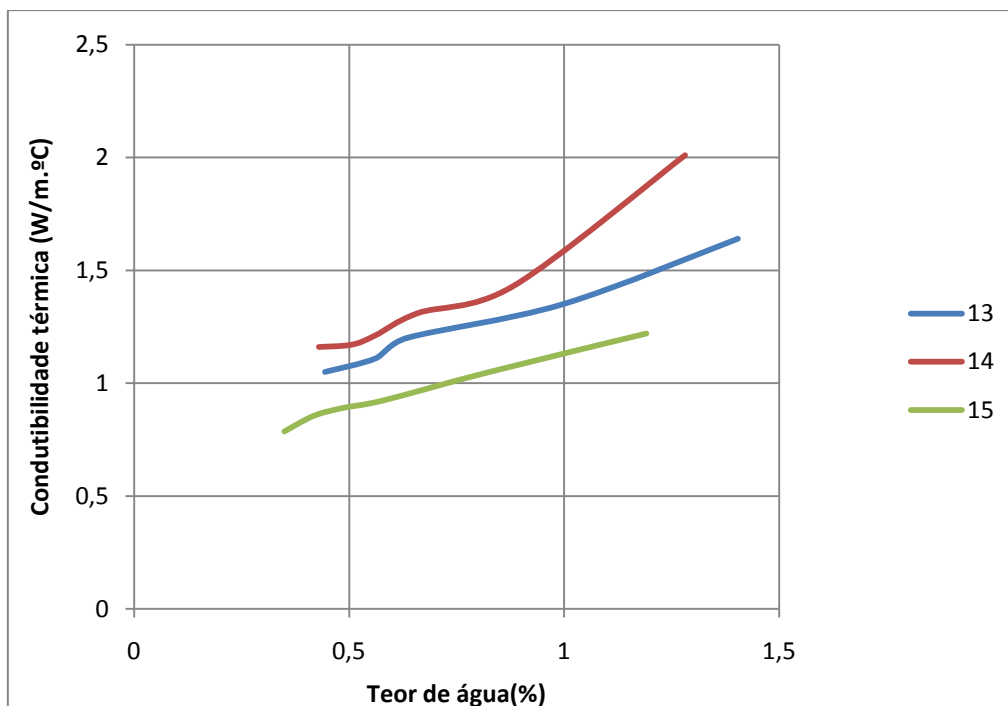


Gráfico 35 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água  
(argamassa 13, 14 e 15)

#### 4.2.5 Argamassas 13, 14 e 15

Estas constituem as argamassas bastardas com uma percentagem de cimento inferior à de cal (representando um traço intermédio nas argamassas bastardas).

Os gráficos de variação do teor em água não apresentam o processo de desadsorção nas argamassas 14 e 15, porque os dados recolhidos foram considerados como não representativos do real processo de desadsorção (porque apresentavam valores de teor de água negativos, o que é impossível). Assim, o efeito de histerese não se verifica neste grupo de argamassas.

Em relação à análise da variação da condutibilidade térmica, importa referir que esta mantém-se constante até atingir o nível de humidade relativa de 90%. Após este nível a condutibilidade térmica deste grupo de argamassas cresce significativamente.

Tal como nas argamassas anteriores o aumento do teor de água provoca uma variação relativamente constante na condutibilidade térmica, verificando-se que as argamassas com menor valor de condutibilidade térmica são a de maior relação A/L.

## Argamassa 16

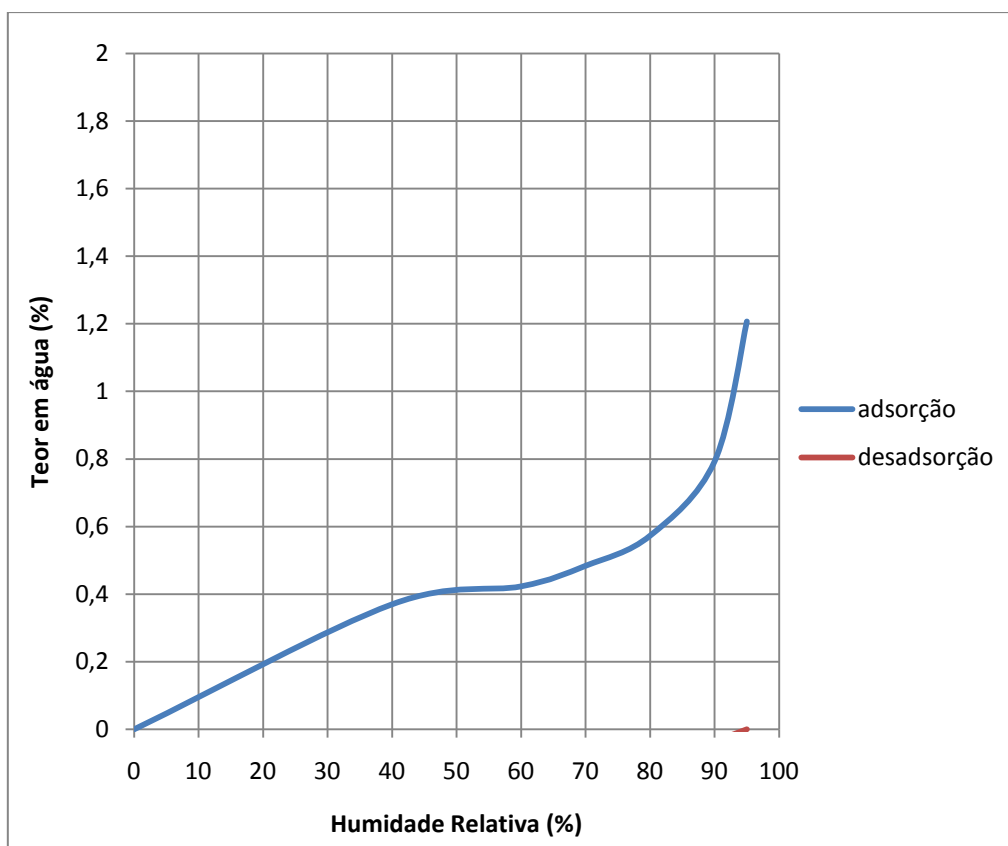


Gráfico 36 – Variação teor em água (argamassa 16)

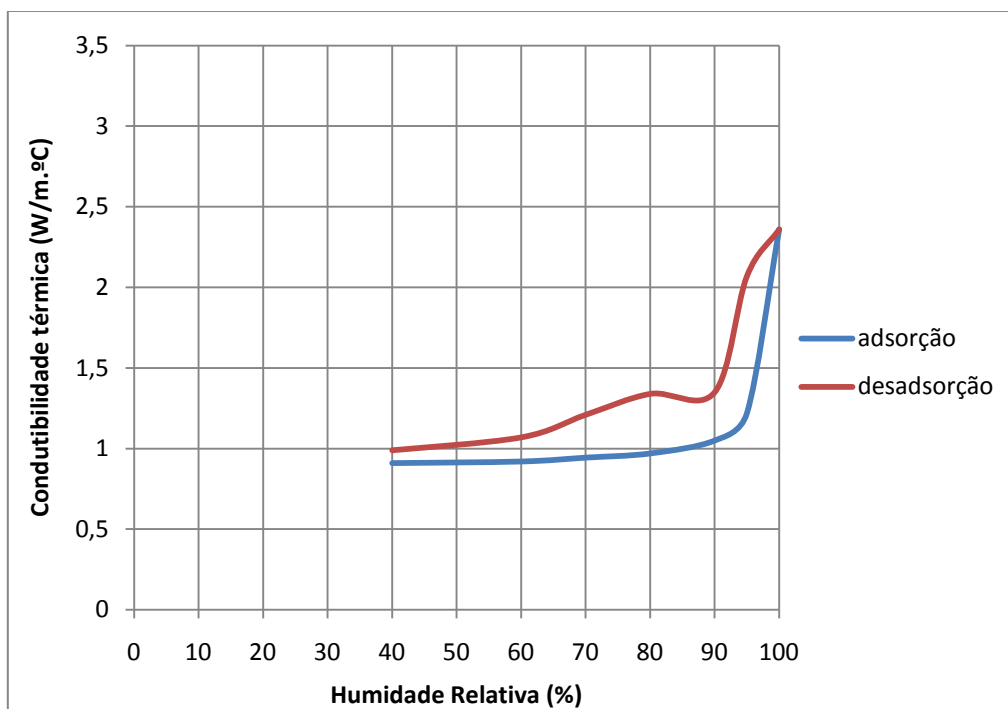


Gráfico 37 – Variação da condutibilidade térmica (argamassa 16)

## Argamassa 17

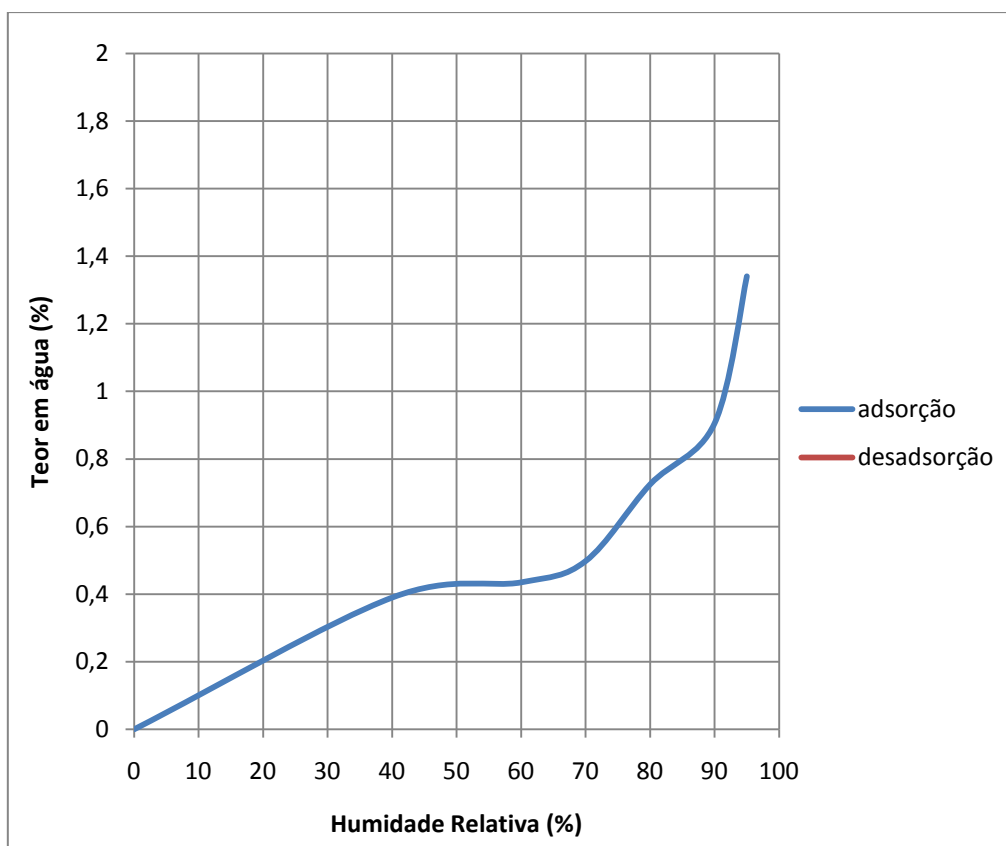


Gráfico 38 - Variação teor em água (argamassa 17)

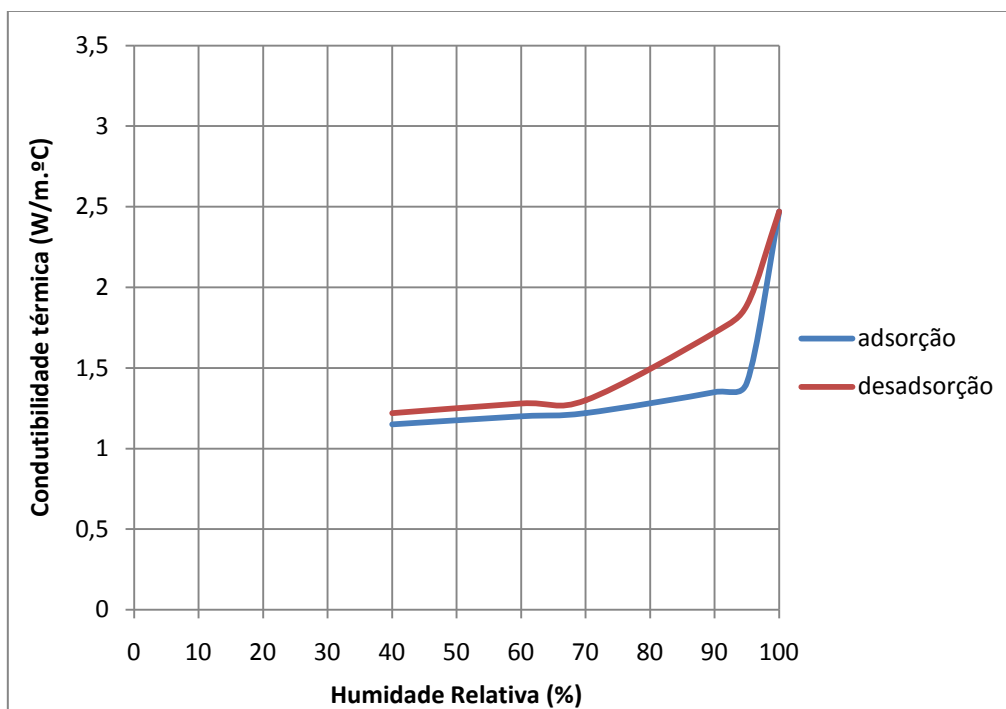


Gráfico 39 - Variação da condutibilidade térmica (argamassa 17)

## Argamassa 18

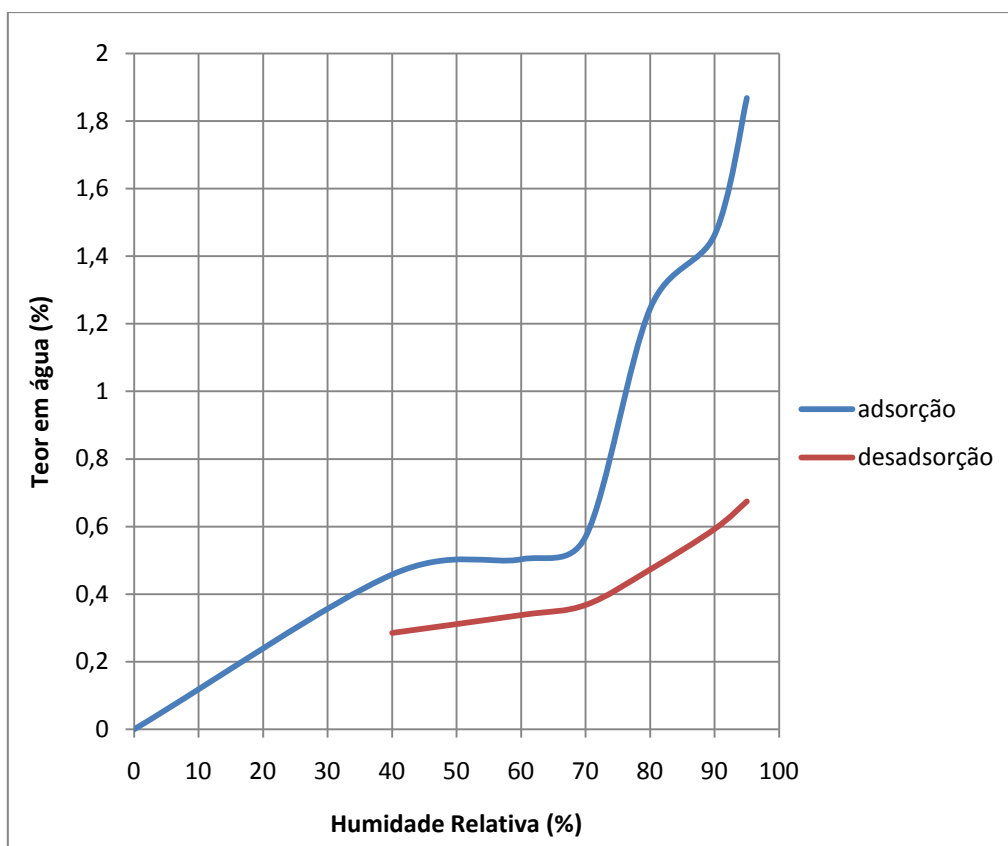


Gráfico 40 – Variação teor em água (argamassa 18)

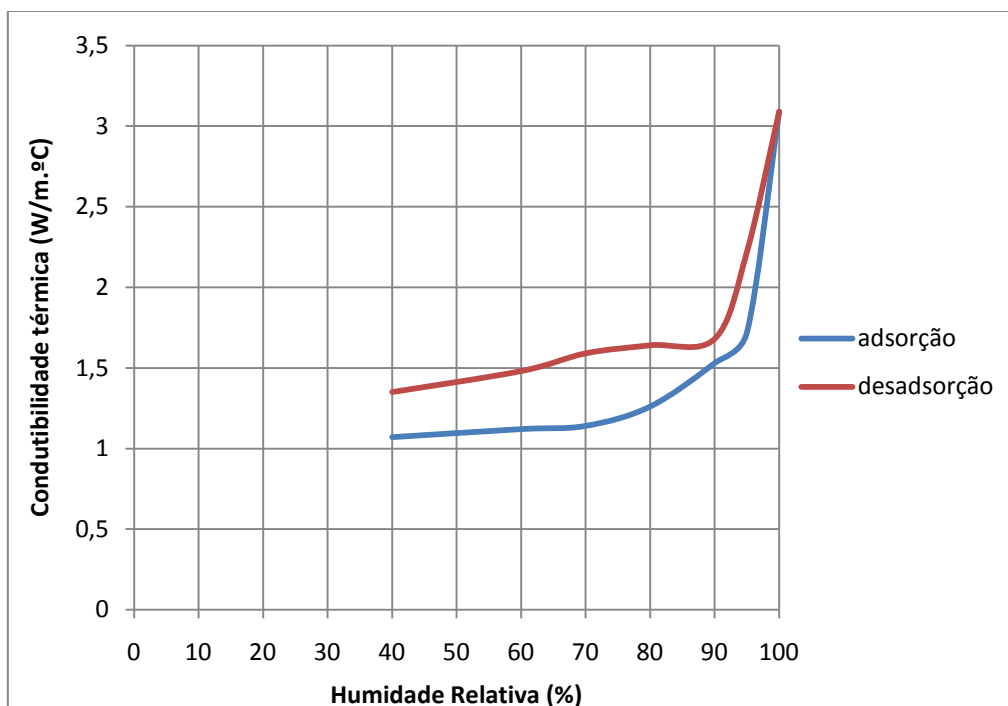


Gráfico 41 – Variação da condutibilidade térmica (argamassa 18)



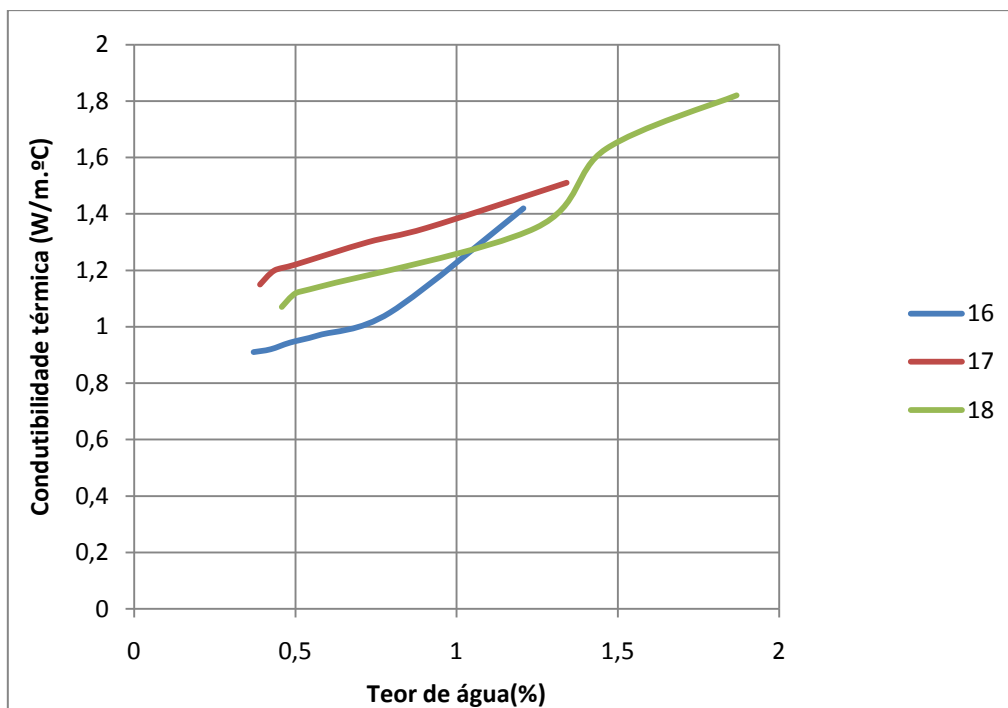


Gráfico 42 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água  
(argamassa 16, 17 e 18)

#### 4.2.6 Argamassas 16, 17 e 18

Este grupo representa as argamassas bastardas com menor percentagem de cimento, ao contrário da percentagem de cal que é a máxima de todas argamassas ensaiadas.

Quanto aos gráficos de variação do teor em água, para as argamassas 16 e 17 não são apresentados os processos de desadsorção porque foram considerados não representativos do real processo de desadsorção. Para a argamassa 18 o efeito de histerese não se verifica, uma vez que no processo de desadsorção o teor em água chega a ser menor que no processo de adsorção.

É importante ainda salientar que no processo de adsorção existe um crescimento significativo do teor em água a partir dos 70% de humidade relativa, sendo este o grupo das argamassas bastardas que adsorve maior vapor de água, em particular a argamassa 18 (cerca de 1,9%).

A argamassa 18 é a segunda argamassa bastarda com o valor de condutibilidade térmica mais elevado (com um valor para o provete saturado de 3,09 W/m°C). Constata-se ainda que o aumento do teor de água provoca um crescimento constante da condutibilidade térmica.

### 4.3 Betão

#### Betão 1 (C25/30)

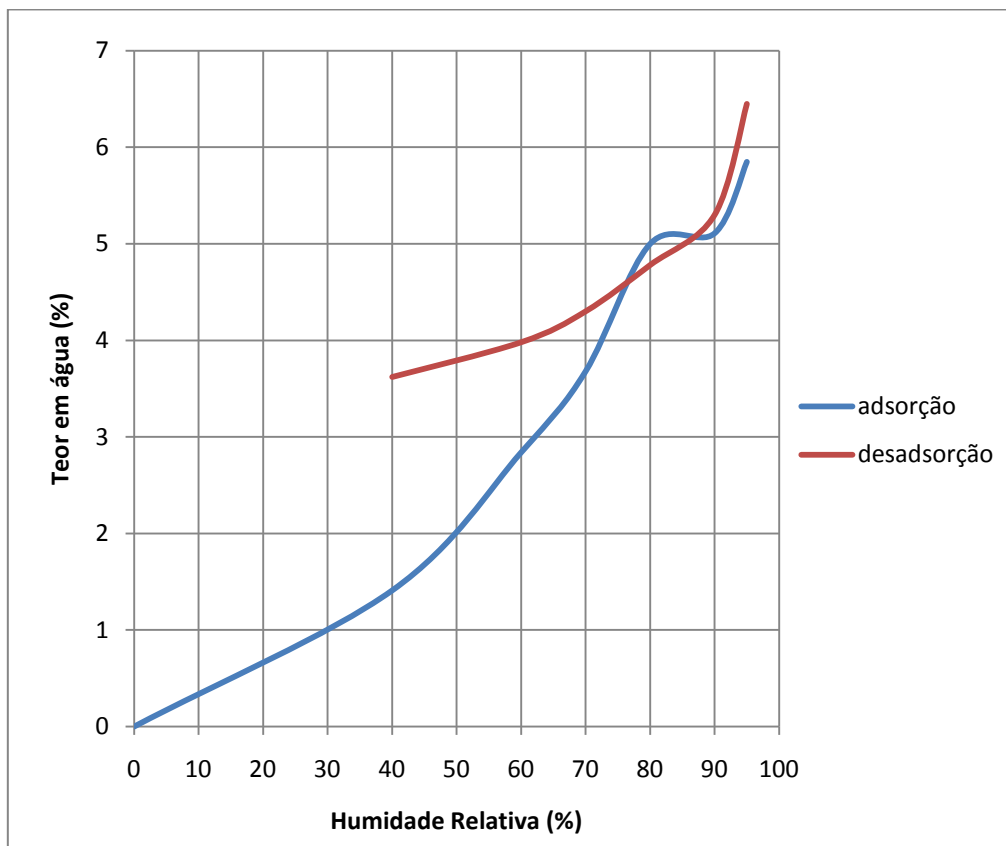


Gráfico 43 – Variação teor em água (Betão 1)

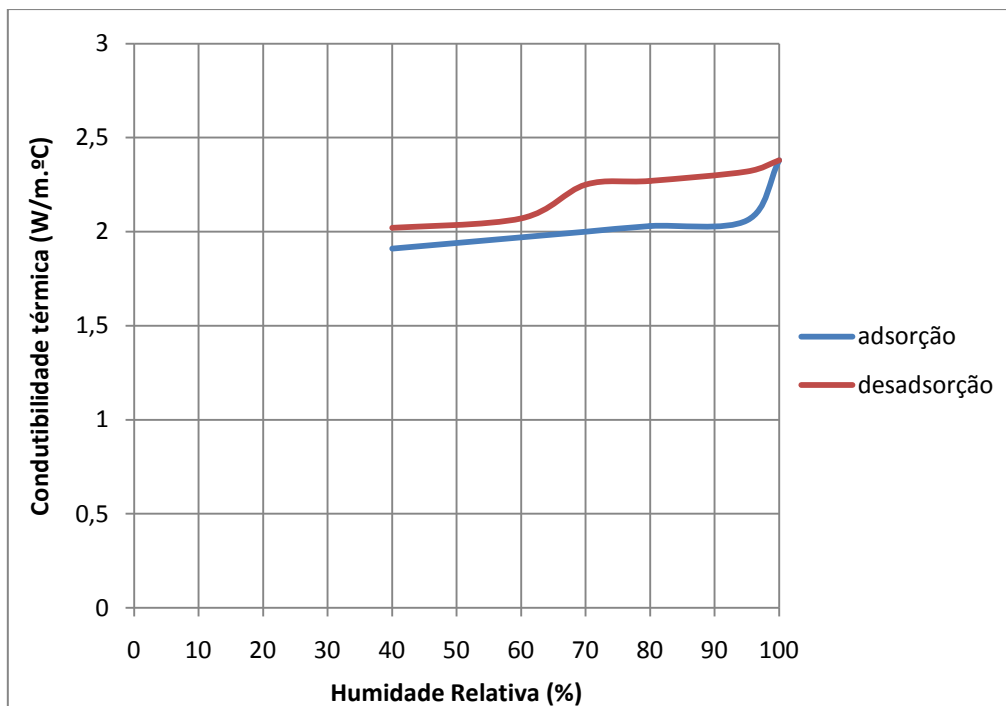


Gráfico 44 – Variação da condutibilidade térmica (Betão 1)

## Betão 2 (C30/37)

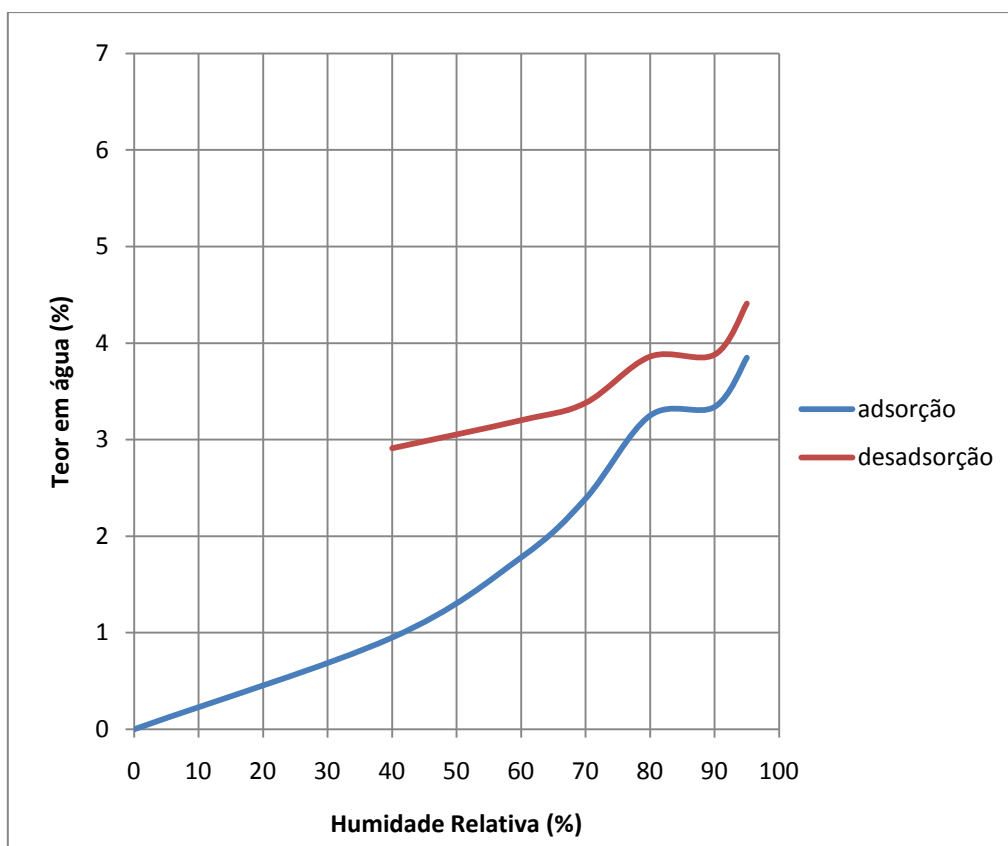


Gráfico 45 – Variação teor em água (Betão 2)

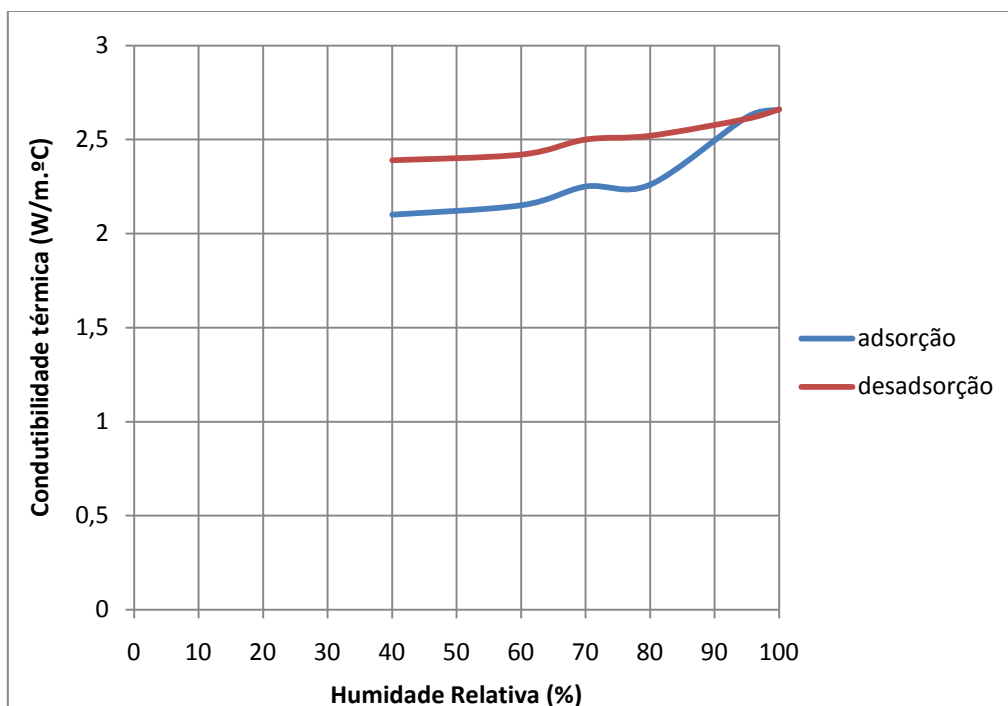


Gráfico 46 – Variação da condutibilidade térmica (Betão 2)

### Betão 3 (C16/20)

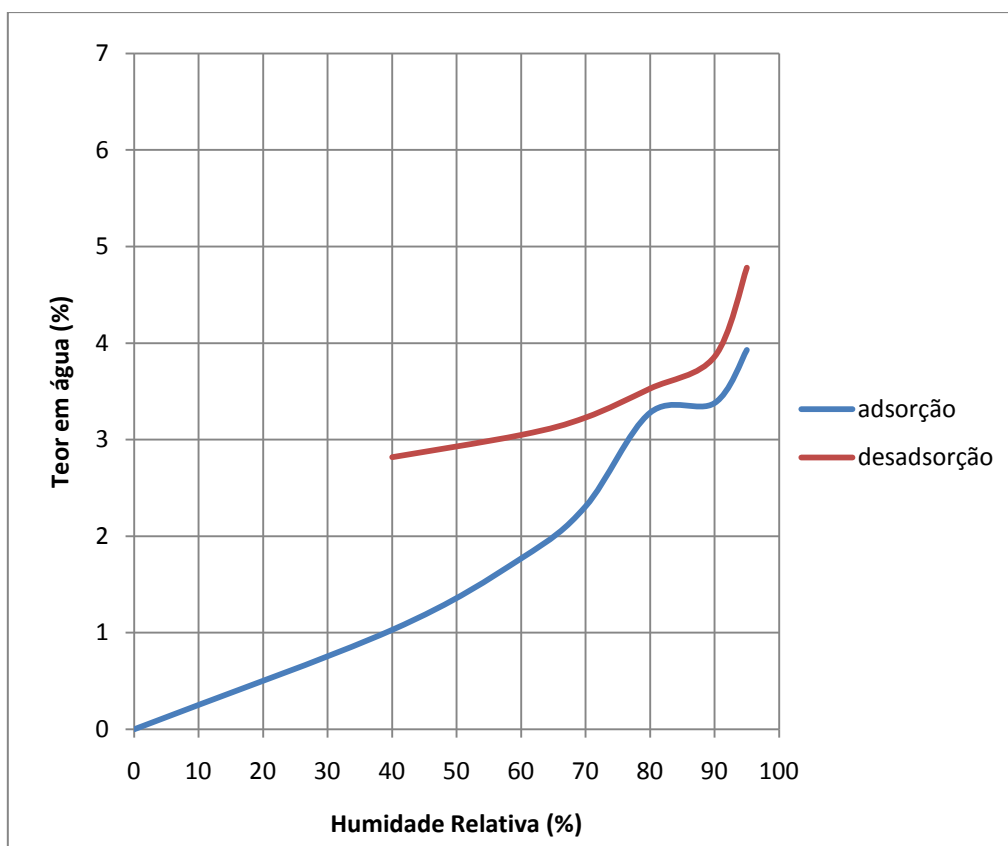


Gráfico 47 - Variação teor em água (Betão 3)

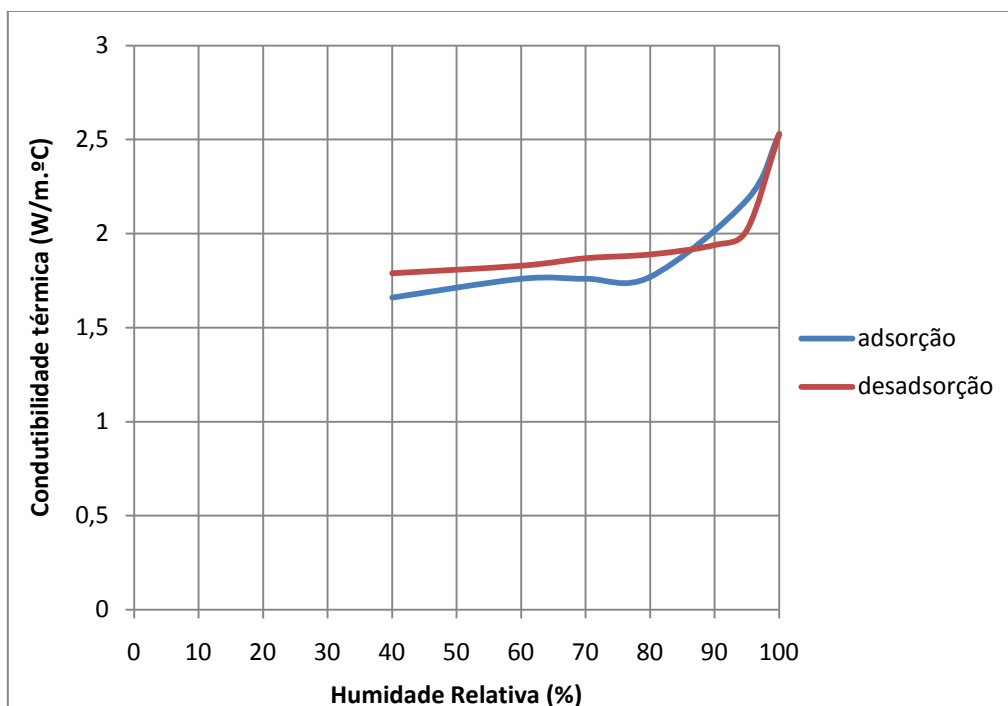


Gráfico 48 - Variação da condutibilidade térmica (Betão 3)

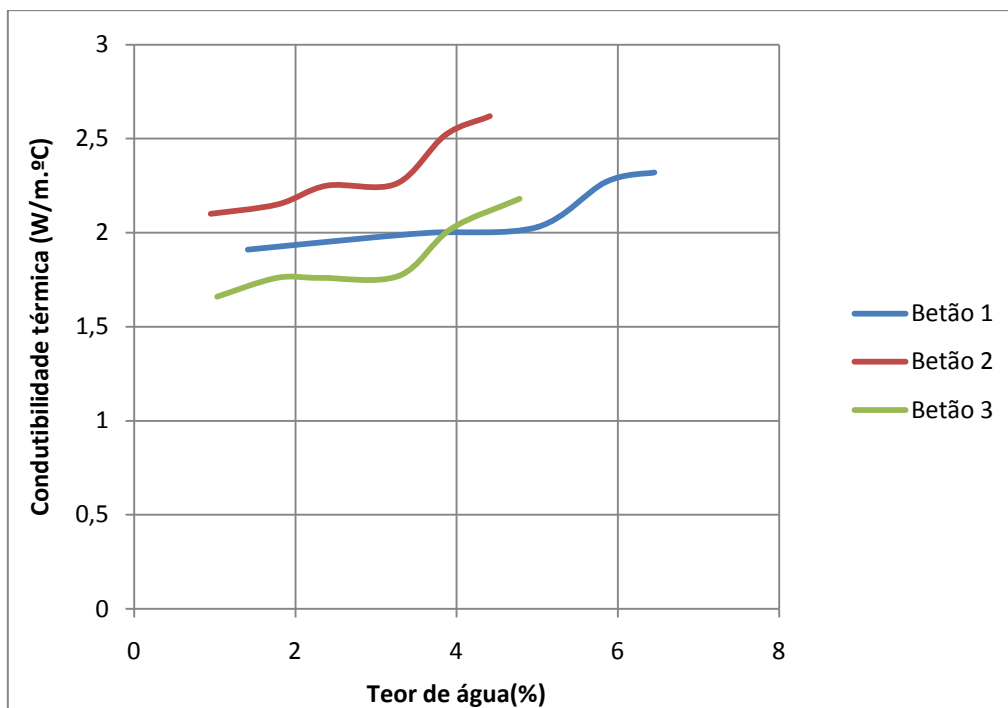


Gráfico 49 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (Betões)

#### 4.4 Bloco argila expandida

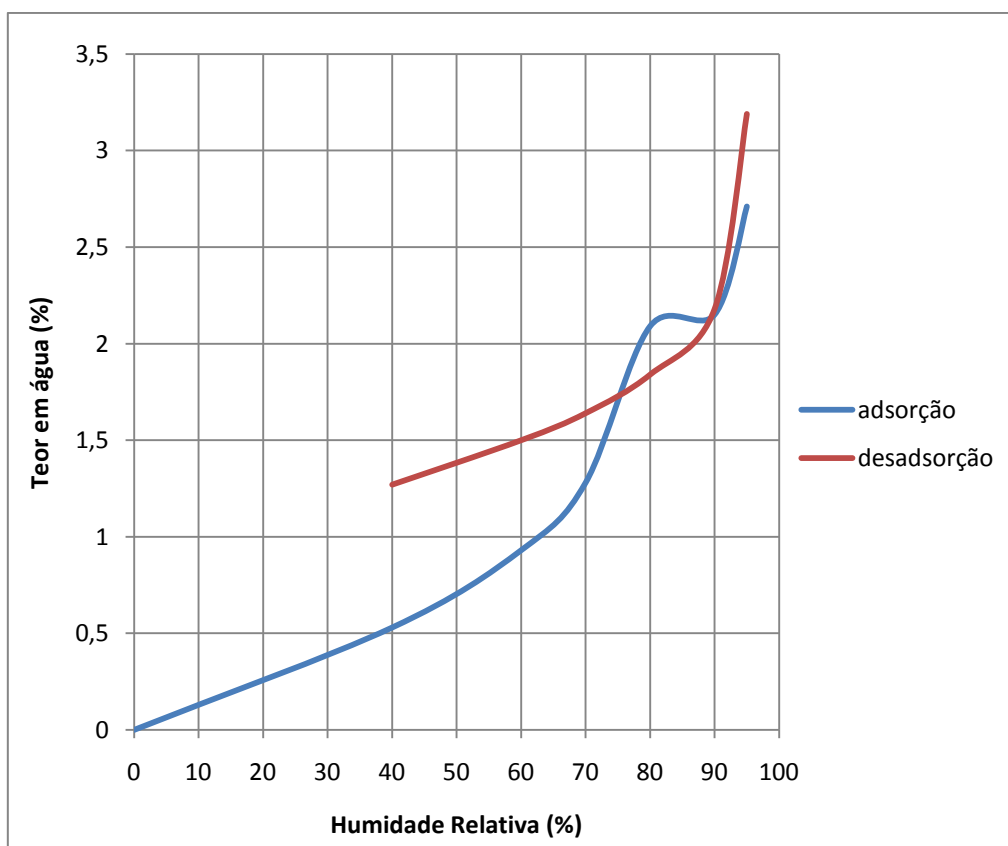


Gráfico 50 – Variação teor em água (argila expandida)

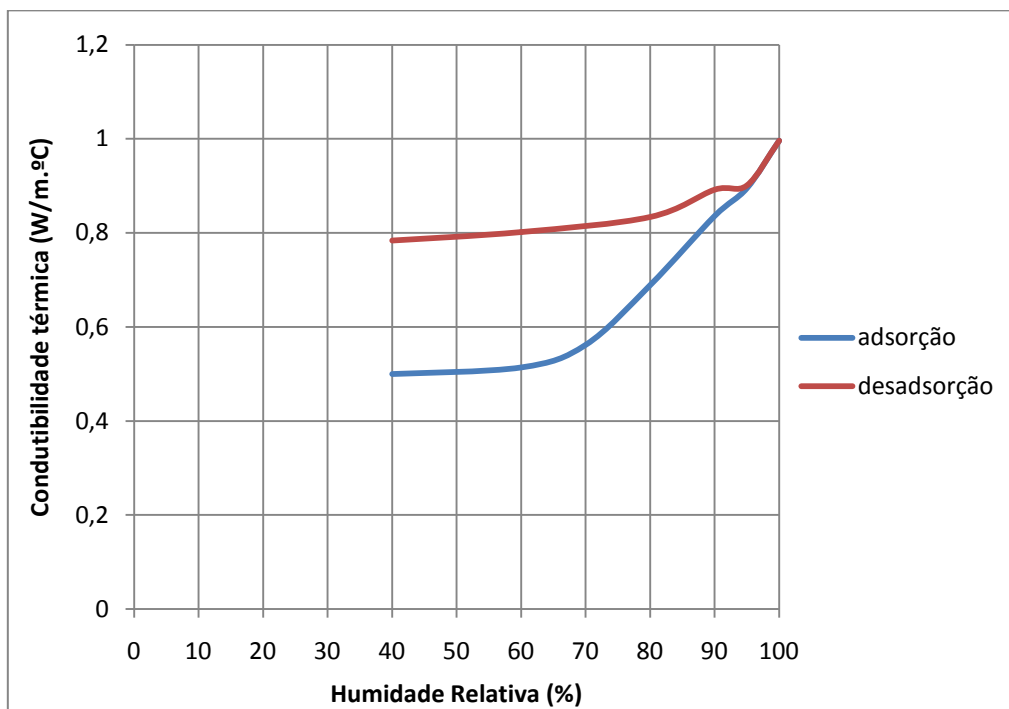


Gráfico 51 – Variação da condutibilidade térmica (argila expandida)

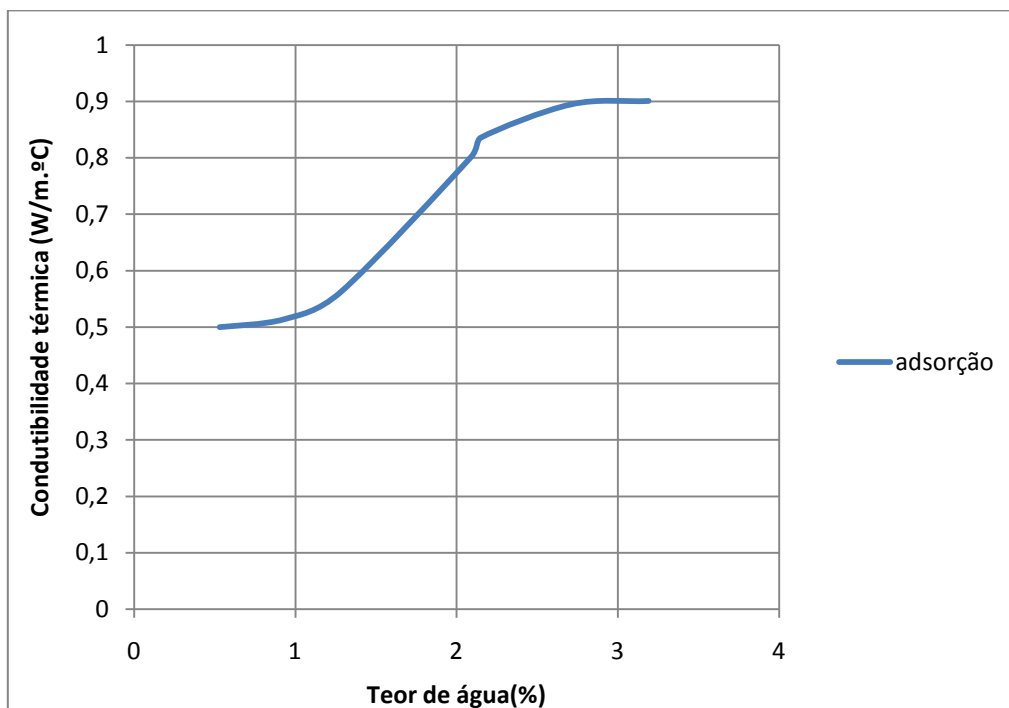


Gráfico 52 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (argila expandida)

#### 4.4.1 Grupo: Betões e argila expandida

**Quadro 5 - Classes dos betões**

Nome	Classe betão	Classe exposição
Betão 1	C25/30	XC2
Betão 2	C30/37	XC4
Betão 3	C16/20	X0

Neste grupo, os betões apresentam um efeito de histerese bastante significativo, que se vai tornando mais evidente quanto mais próximo estiver do nível mínimo de humidade relativa estudado (40%). Pode-se ainda constatar que atingem valores máximos de teor em água para a adsorção próximos dos 7%.

No que diz respeito à variação da condutibilidade térmica constata-se que o aumento do teor em água praticamente não influencia a respectiva condutibilidade (só para valores de teor de água superiores a 4% é que esta é algo afectada). Os diversos betões têm um comportamento similar à influência do teor de água (sendo o Betão 2 o que apresenta o maior de valor de condutibilidade).

A argila expandida por seu turno apresenta visualmente um gráfico de adsorção relativamente semelhante aos betões, atingindo cerca de metade do valor do teor em água dos betões ensaiados. Registando ainda um efeito de histerese acentuado (essencialmente entre os 40% e os 70% de humidade relativa).

Já a influência do teor de água na argila expandida é notória, uma vez que a partir do nível de 70% de humidade relativa, a condutibilidade térmica aumenta bastante. Esta chega mesmo a duplicar de valor ao atingir os 2,5% de teor em água, apresentando um gráfico de variação da condutibilidade térmica em função do teor de água em forma de S.

## 4.5 Poliestireno expandido (EPS)

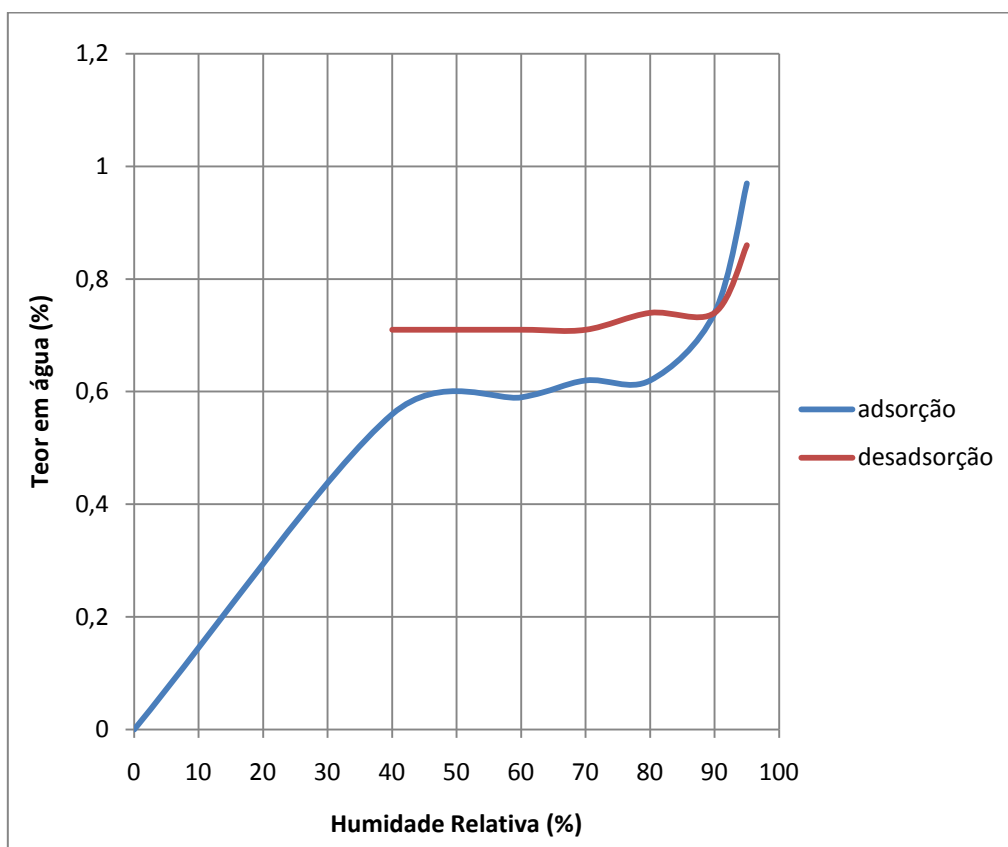


Gráfico 53 - Variação teor em água (EPS)

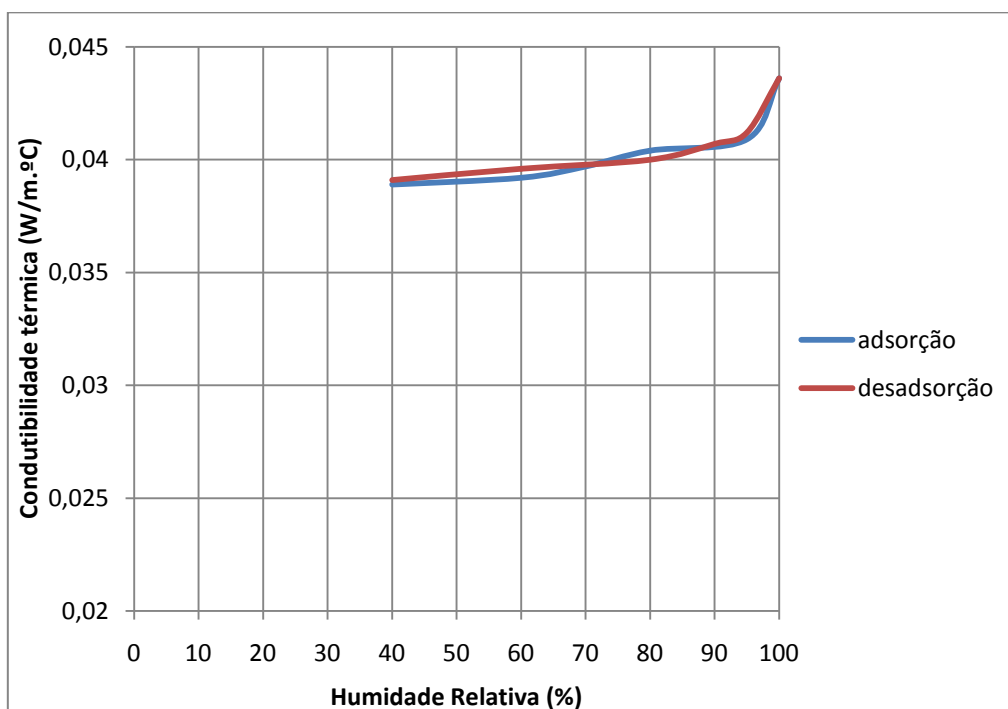


Gráfico 54 - Variação da condutibilidade térmica (EPS)



## 4.6 Poliestireno extrudido (XPS)

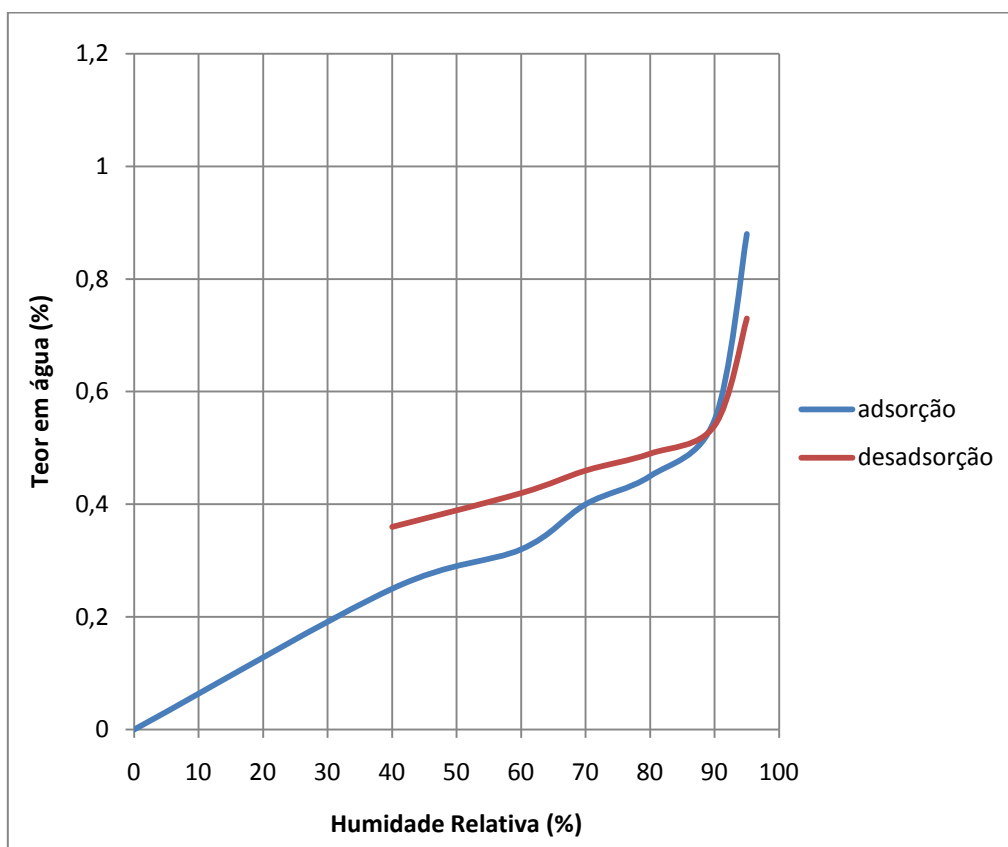


Gráfico 55 – Variação teor em água (XPS)

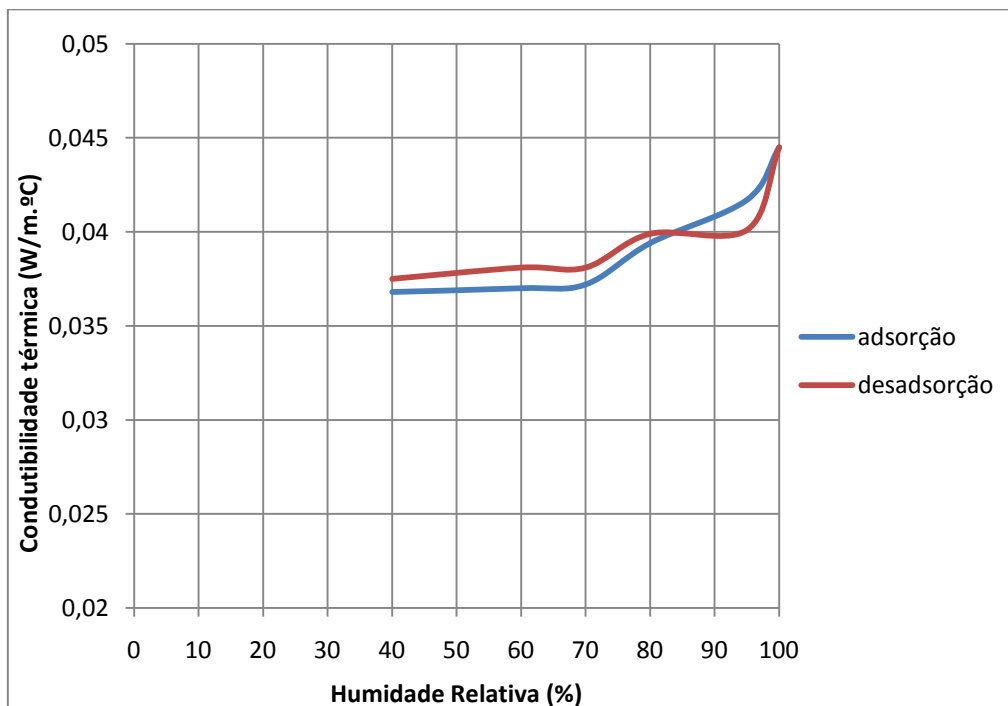


Gráfico 56 – Variação da condutibilidade térmica (XPS)

## 4.7 Lã mineral

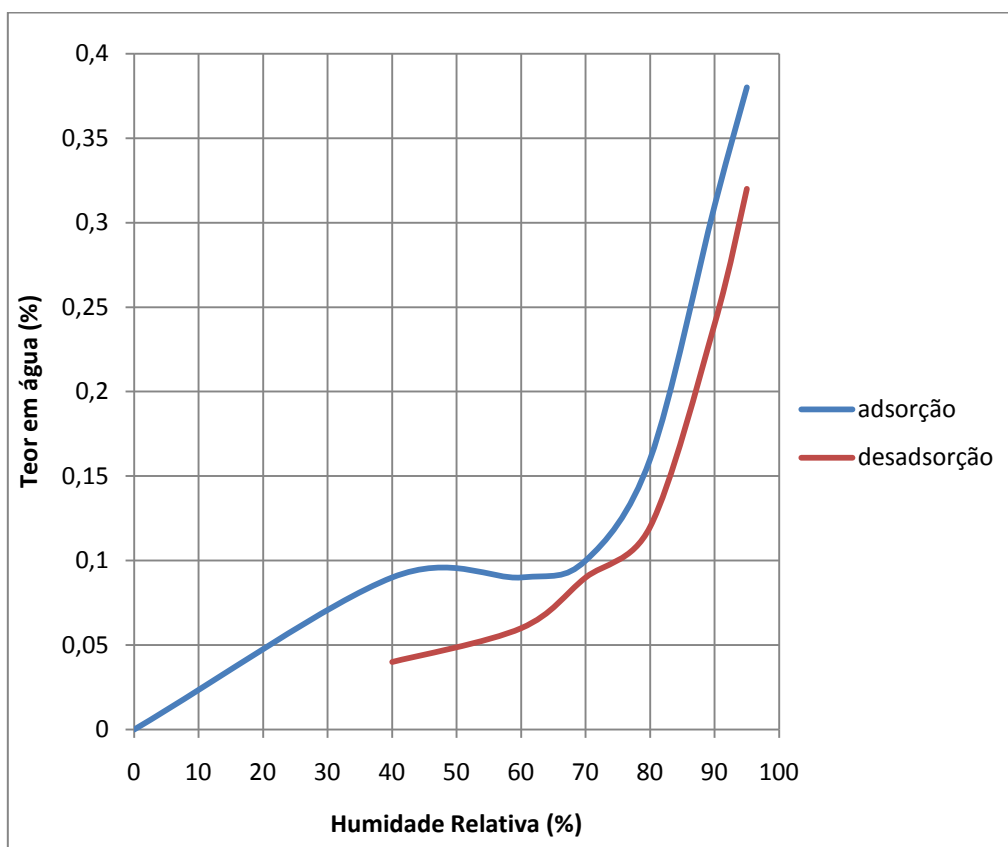


Gráfico 57 - Variação teor em água (lã mineral)

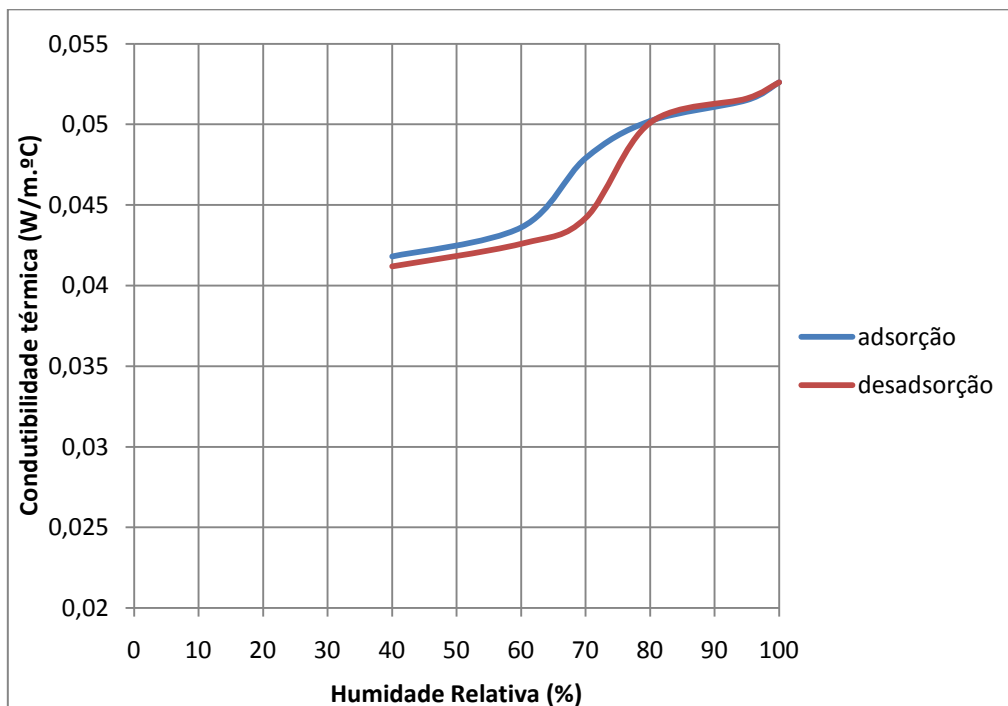


Gráfico 58 - Variação da condutibilidade térmica (lã mineral)

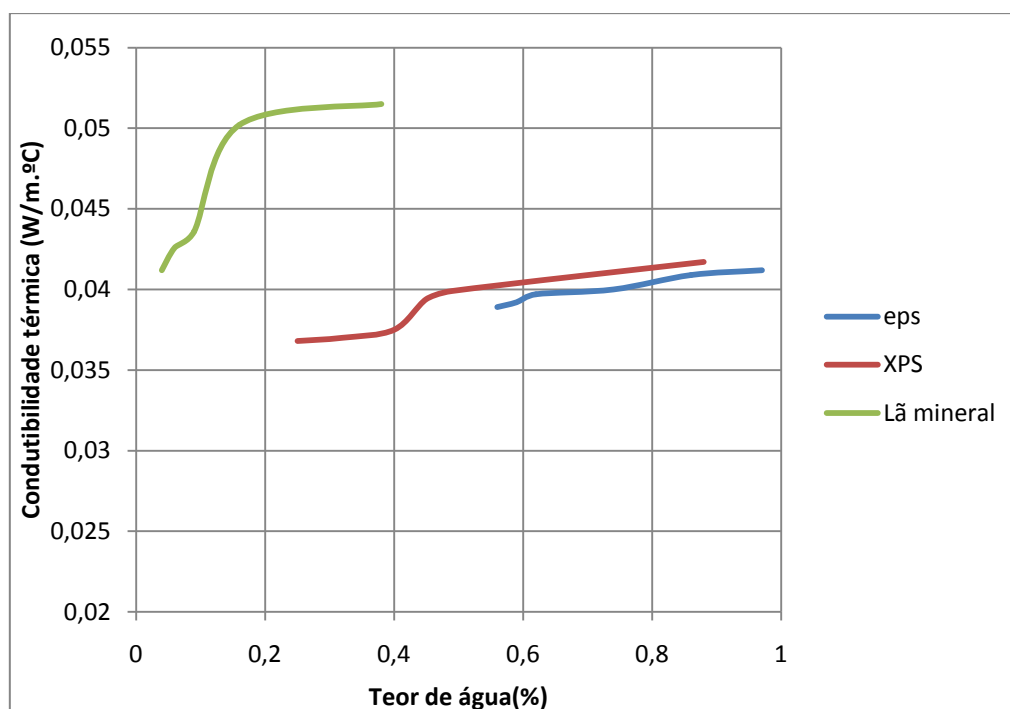


Gráfico 59 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (isolantes térmicos)

#### 4.7.1 Grupo: Isolantes térmicos

Da análise dos gráficos de variação do teor em água dos isolantes térmicos (poliestireno moldado, extrudido e lã mineral) verifica-se que adsorvem pouco vapor de água e que o efeito de histerese (apesar de existir) é pouco significativo.

No caso mais particular do poliestireno moldado expandido constata-se que este adsorve vapor de água essencialmente na fase mais seca (entre os 0% e os 40% de humidade relativa) mantendo constante o seu valor de teor em água a partir desse mesmo nível. Só a partir dos 90% de humidade relativa é que volta a registar um acentuado crescimento do teor em água. De referir ainda que no processo de desadsorção verifica-se um ligeiro efeito de histerese, uma vez que o poliestireno expandido mantém inalterável o teor em água desde o nível de 90% de humidade relativa (não perde teor em água).

O poliestireno extrudido aumenta o seu teor em água de uma forma constante ao longo dos diversos níveis, mas este crescimento torna-se bastante mais acentuado a partir dos 90% de humidade relativa, registando um ligeiro efeito de histerese no processo de desadsorção a partir deste mesmo nível de humidade relativa.

Em relação à lã mineral, esta é a que adsorve menos vapor de água dos três isolantes térmicos. Registrando um grande crescimento do seu valor de teor de água a partir dos 80% de humidade relativa, não apresentando efeito de histerese.

Do gráfico que relaciona a condutibilidade térmica com o respectivo teor de água verifica-se que para os dois poliestirenos estudados o aumento do teor em água não influencia significativamente a respectiva condutibilidade. Ao contrário da lã mineral que apesar de ser o que menos adsorve vapor de água é o que é mais influenciado pelo aumento do teor de água, já que é o que exhibe a maior variação de condutibilidade térmica.

## 4.8 Pedra Natural

### 4.8.1 Calcário

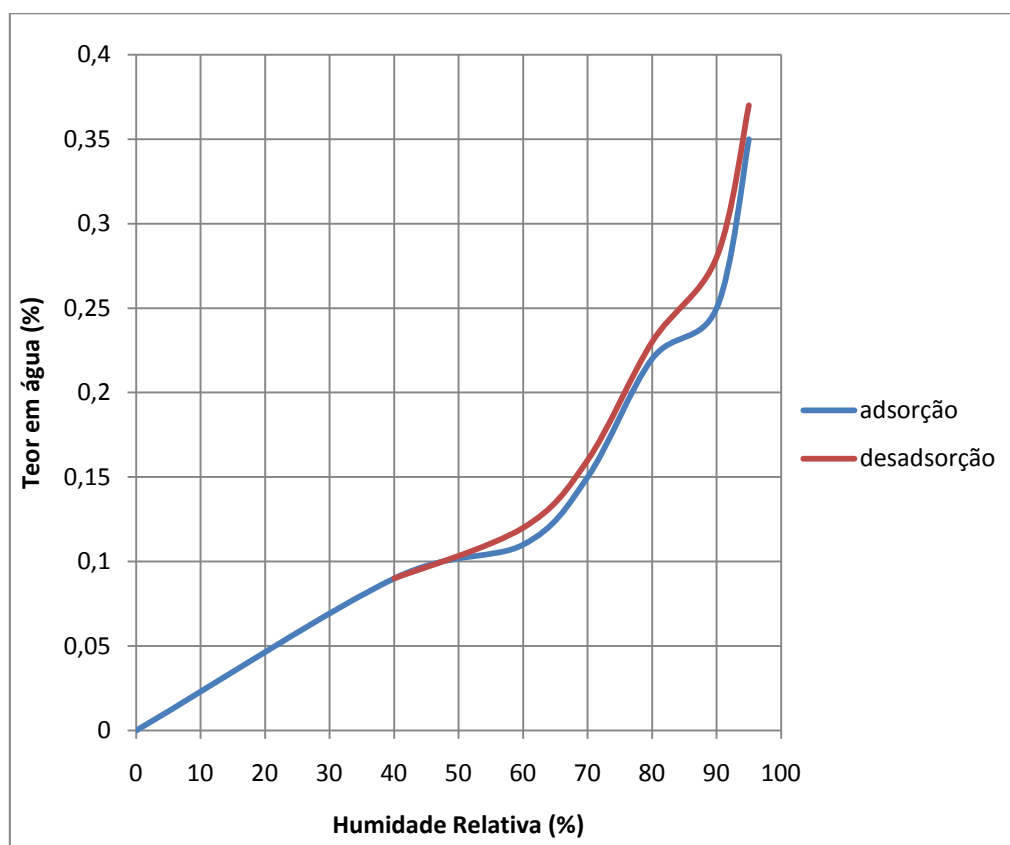


Gráfico 60 – Variação teor em água (calcário)

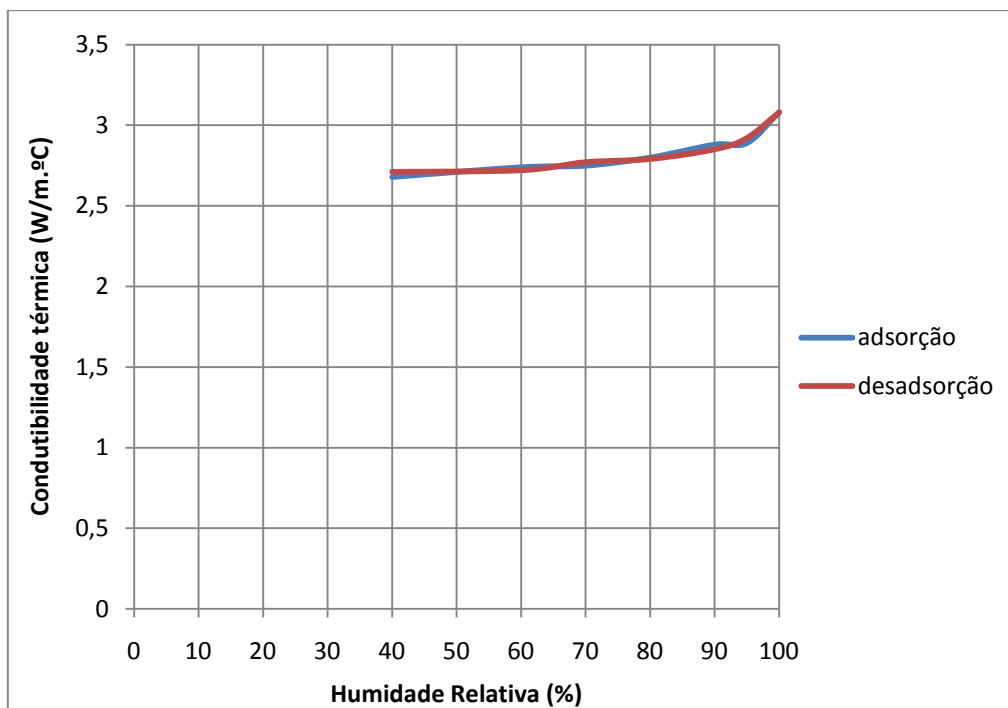


Gráfico 61 – Variação da condutibilidade térmica (calcário)

#### 4.8.2 Encarnado Negrais (calcário)

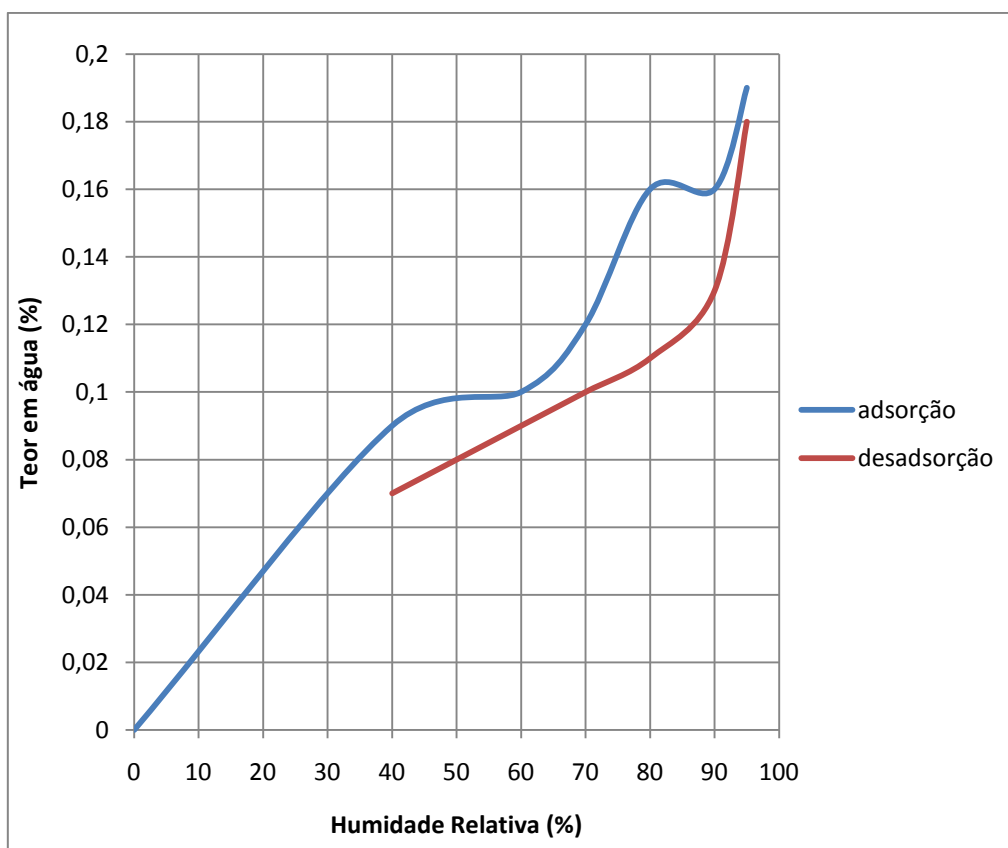


Gráfico 62 – Variação teor em água (encarnado negrais)

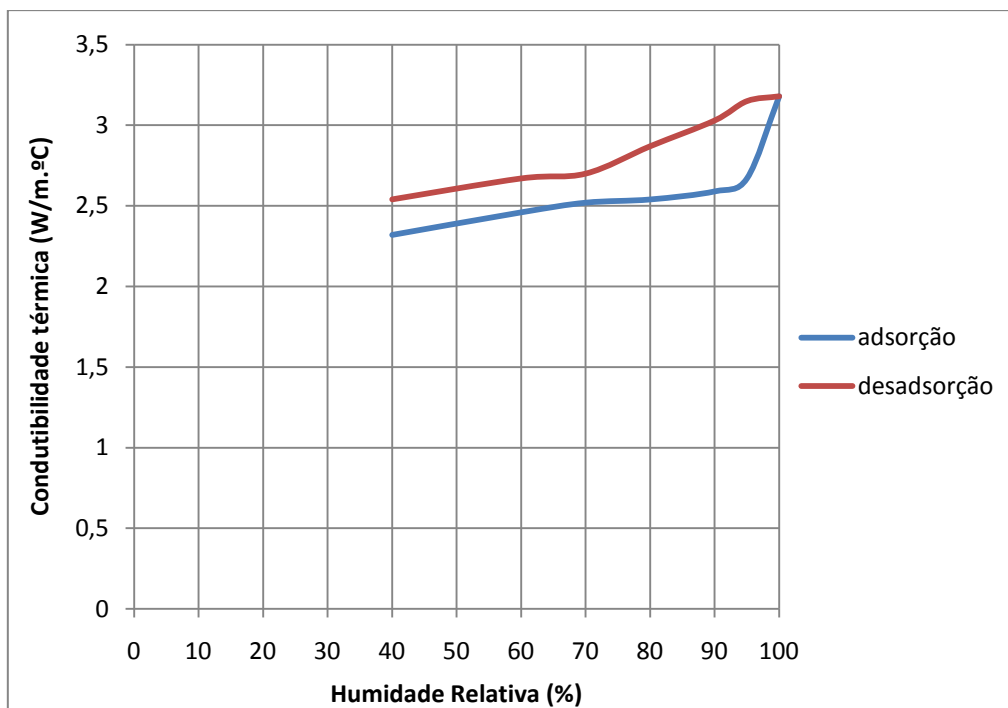


Gráfico 63 – Variação da condutibilidade térmica (encarnado negrais)

#### 4.8.3 Granito

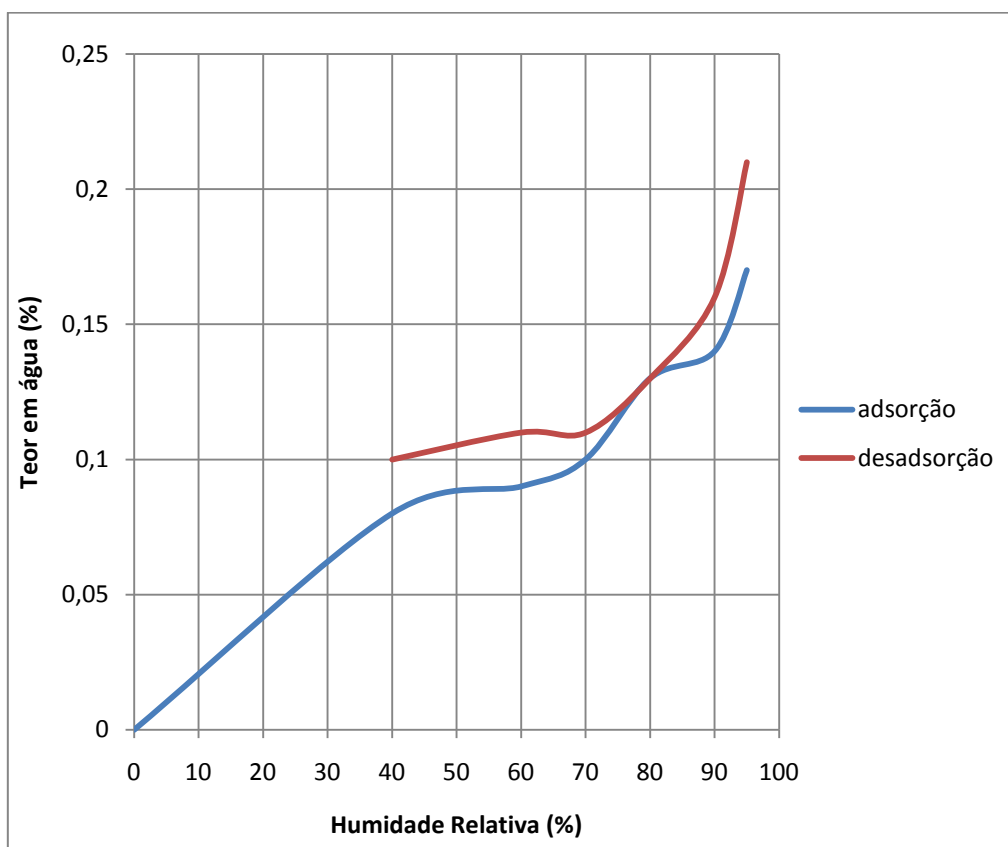


Gráfico 64 – Variação teor em água (granito)

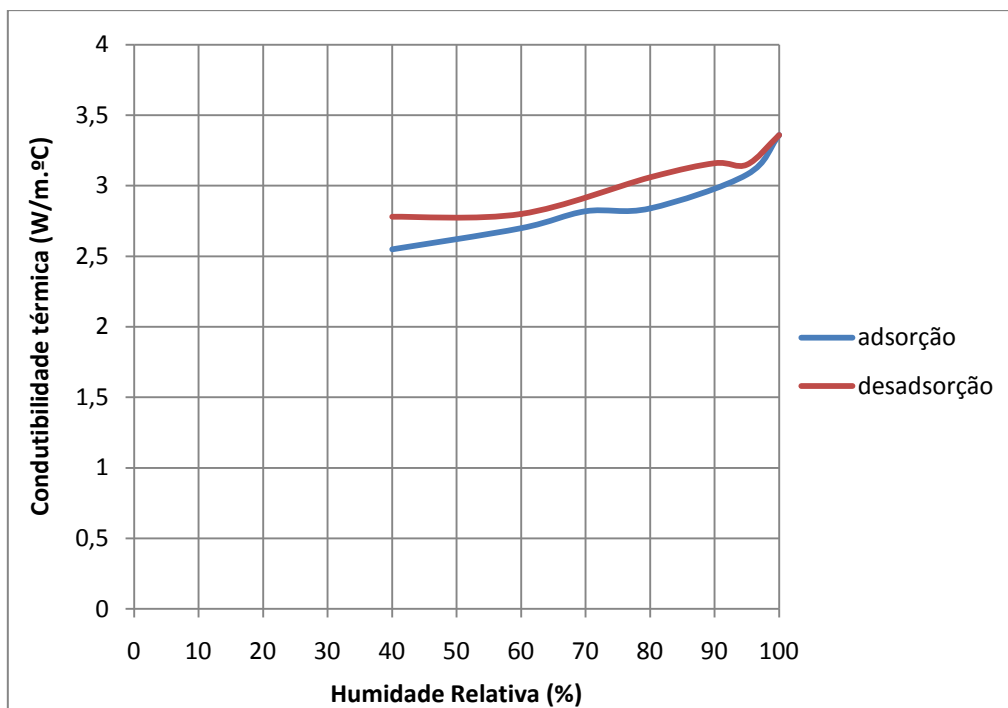


Gráfico 65 – Variação da condutibilidade térmica (granito)

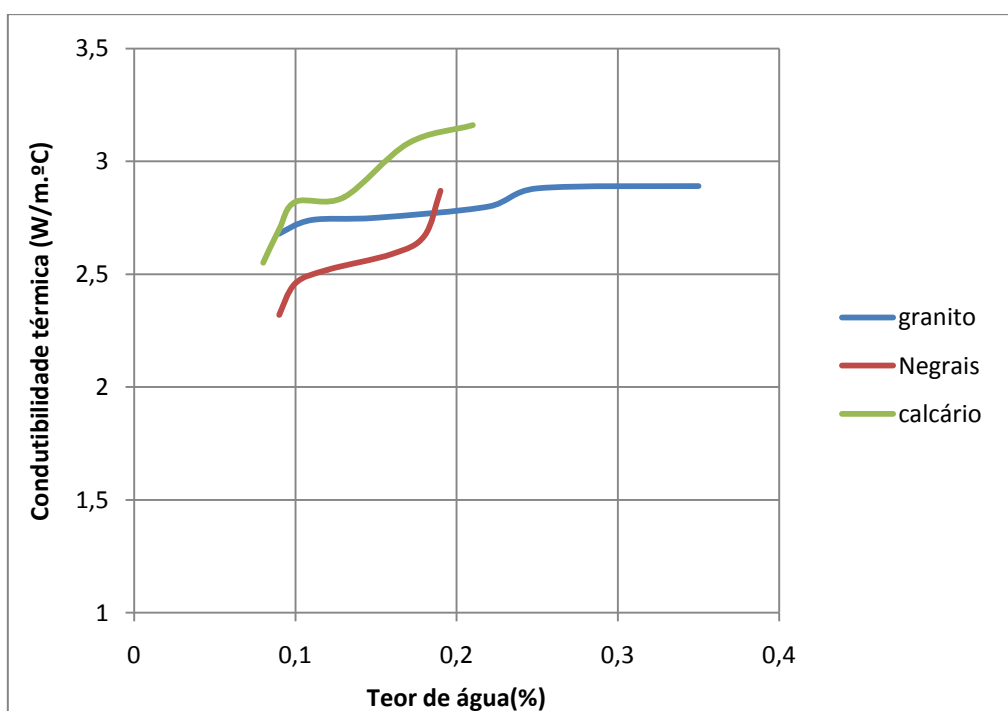


Gráfico 66 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (pedras naturais)

#### 4.8.4 Grupo: Pedras Naturais

O que se apura da análise dos gráficos resultantes da adsorção isotérmica das várias pedras estudadas é que apresentam um comportamento semelhante à adsorção isotérmica, com a diferença de o granito adsorver um pouco mais vapor de água que os dois calcários. Constata-se ainda que adsorvem todos muito pouco vapor de água apresentando um efeito de histerese desprezável, de tão pouco significativo que é.

No que diz respeito à variação da condutibilidade térmica, os calcários são os que mais são influenciados pelo aumento do teor de água, ao contrário do granito que praticamente não varia o seu valor de condutibilidade (mantendo-se constante com o aumento do teor em água).

#### 4.9 Tijolo cerâmico furado

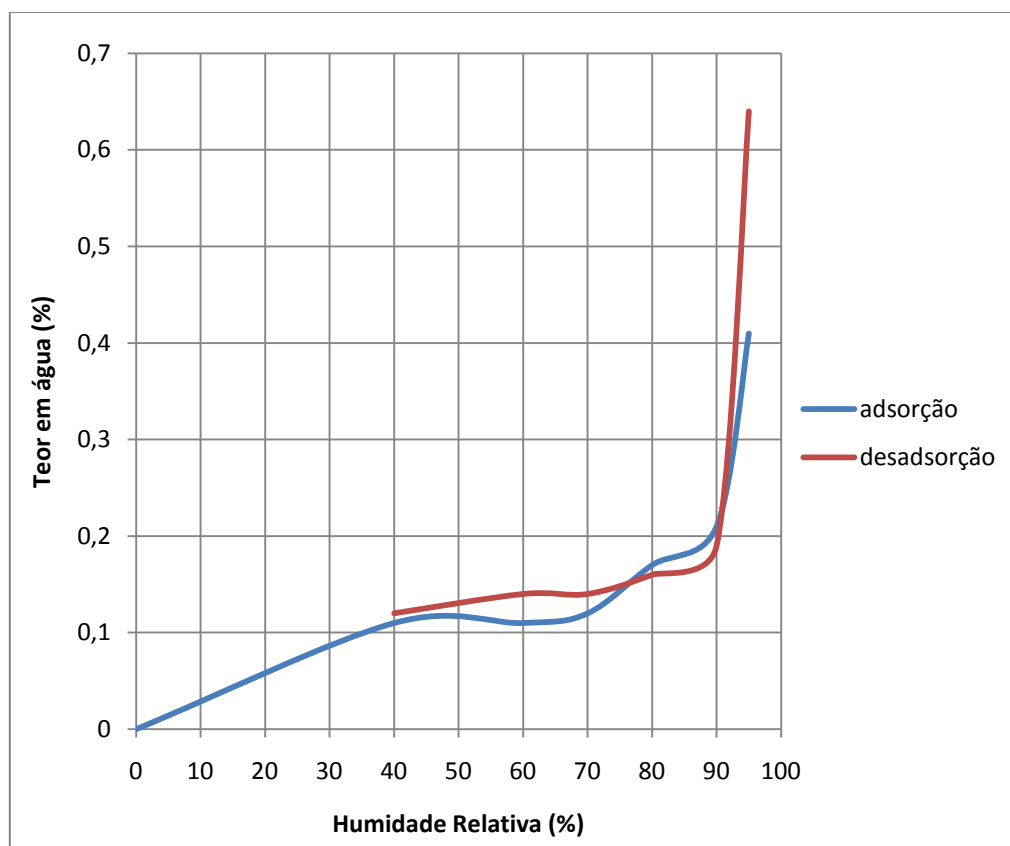


Gráfico 67 – Variação teor em água (tijolo)



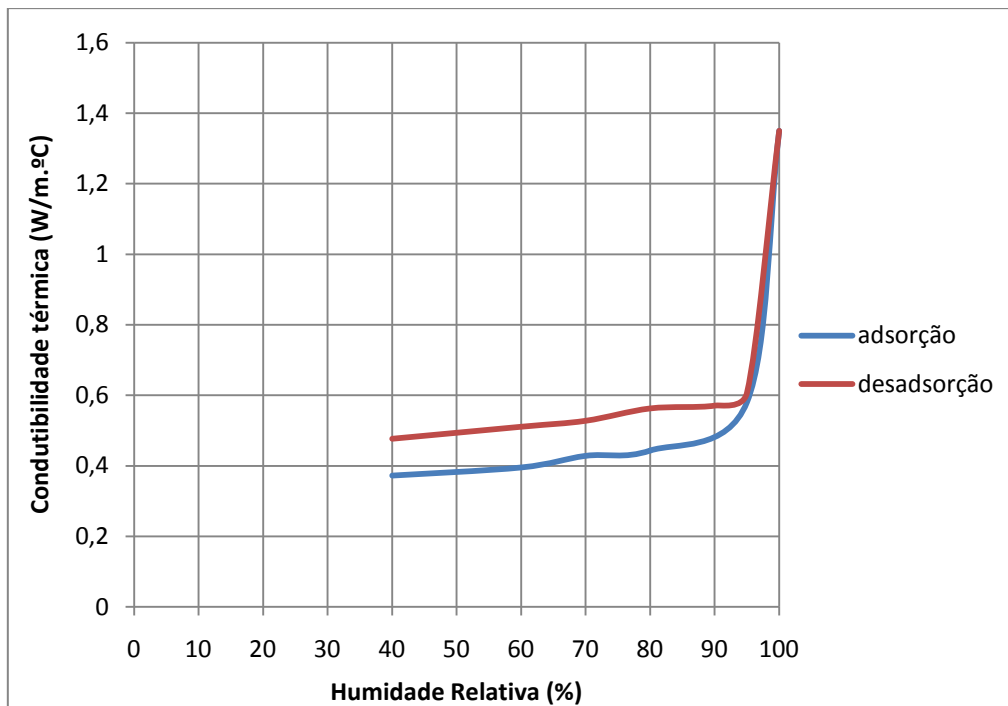


Gráfico 68 – Variação da condutibilidade térmica (tijolo)

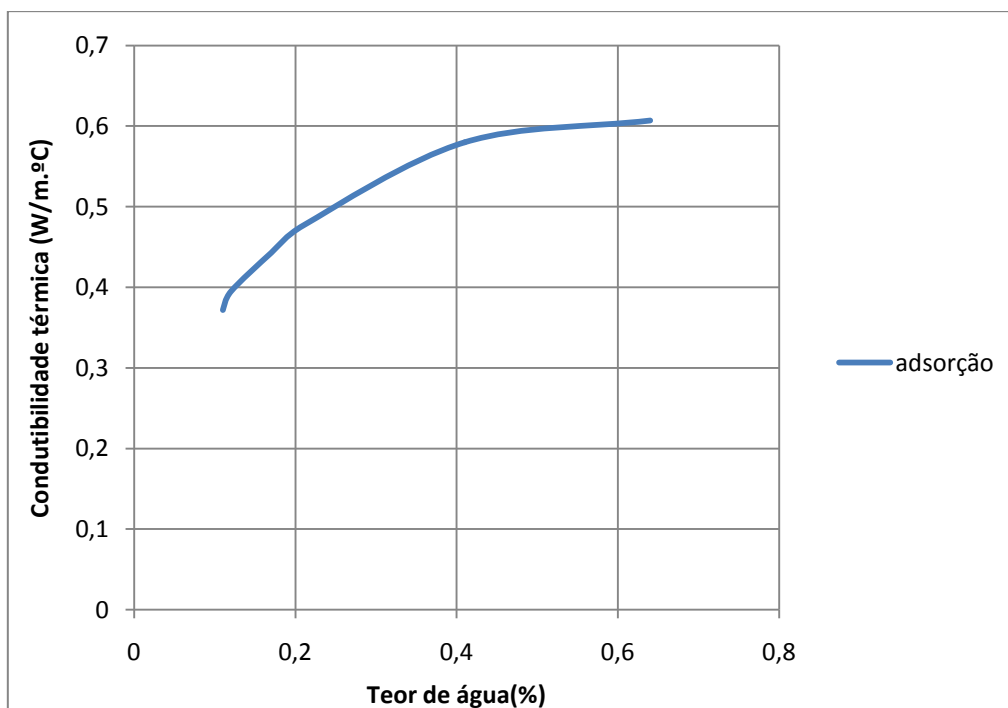


Gráfico 69 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (tijolo)

## 4.10 Cerâmica de forra

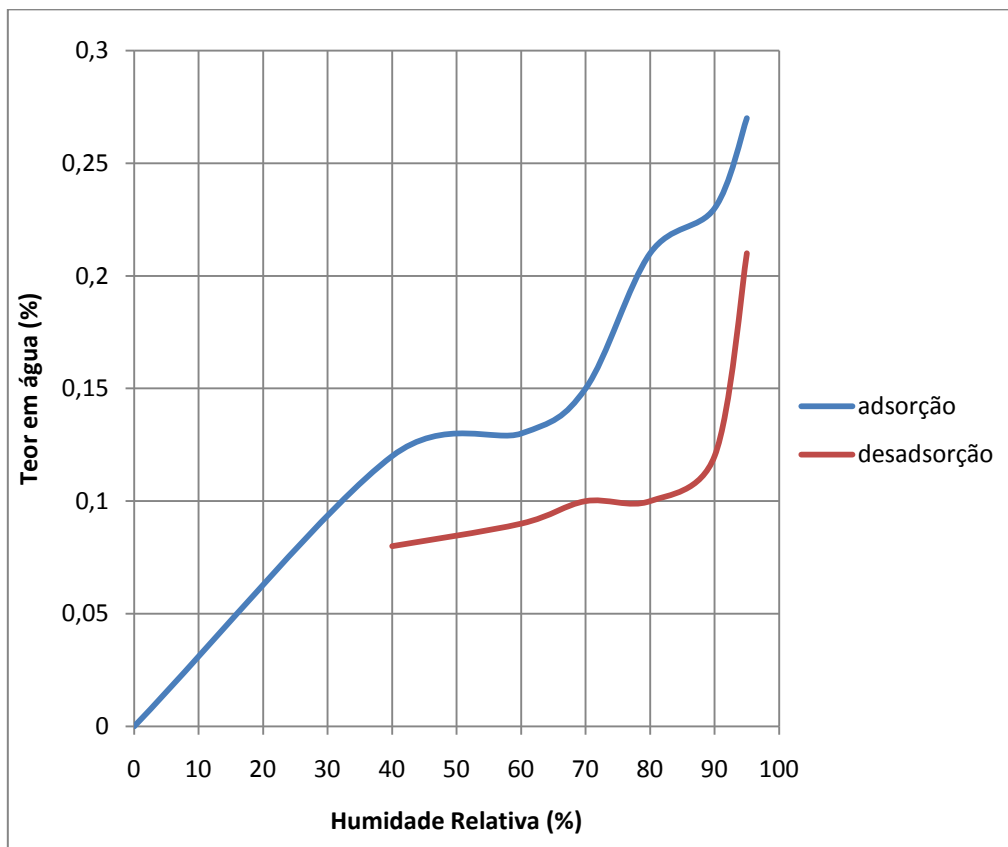


Gráfico 70 – Variação teor em água (forra)

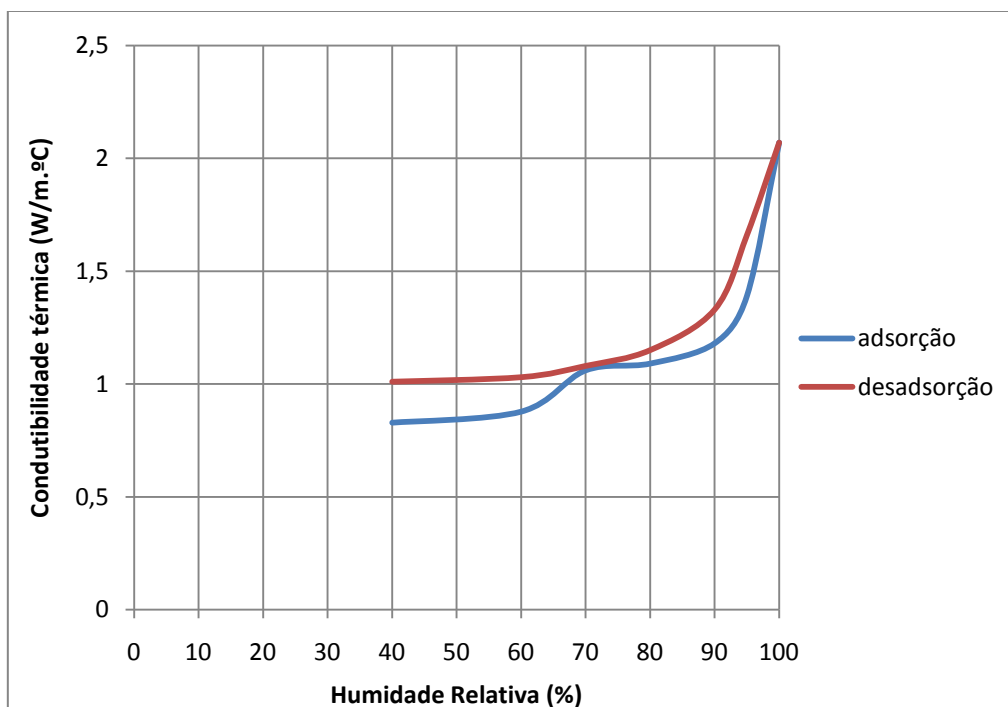


Gráfico 71 – Variação da condutibilidade térmica (forra)

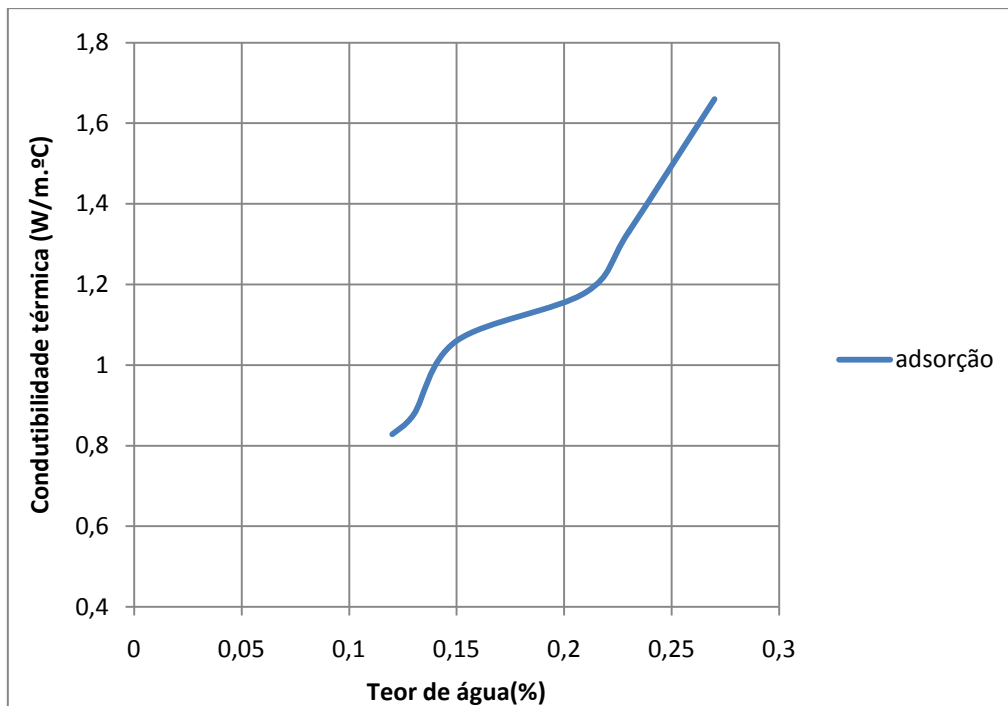


Gráfico 72 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (forra)

#### 4.10.1 Análise de resultados do Grupo: Materiais cerâmicos

O tijolo cerâmico furado exibe um comportamento interessante, visto que em relação à adsorção de vapor de água este mantém-se com valores pouco relevantes até aos 90% de humidade relativa, altura em que o seu teor em água manifesta um crescimento acentuado. No que diz respeito à variação da respectiva condutibilidade térmica, esta apresenta um crescimento significativo (tal como no teor em água) a partir dos 90% de humidade relativa, sendo consideravelmente influenciado pelo aumento do teor de água.

Finalmente, a cerâmica de forra regista uma variação do teor em água em duas fases (dos 0% a 40% de humidade relativa e a partir dos 70%), não apresentando efeito de histerese. Já em relação à variação da condutibilidade térmica constata-se que esta cresce significativamente de valor com o aumento do respectivo teor em água.

## 4.11 Madeira

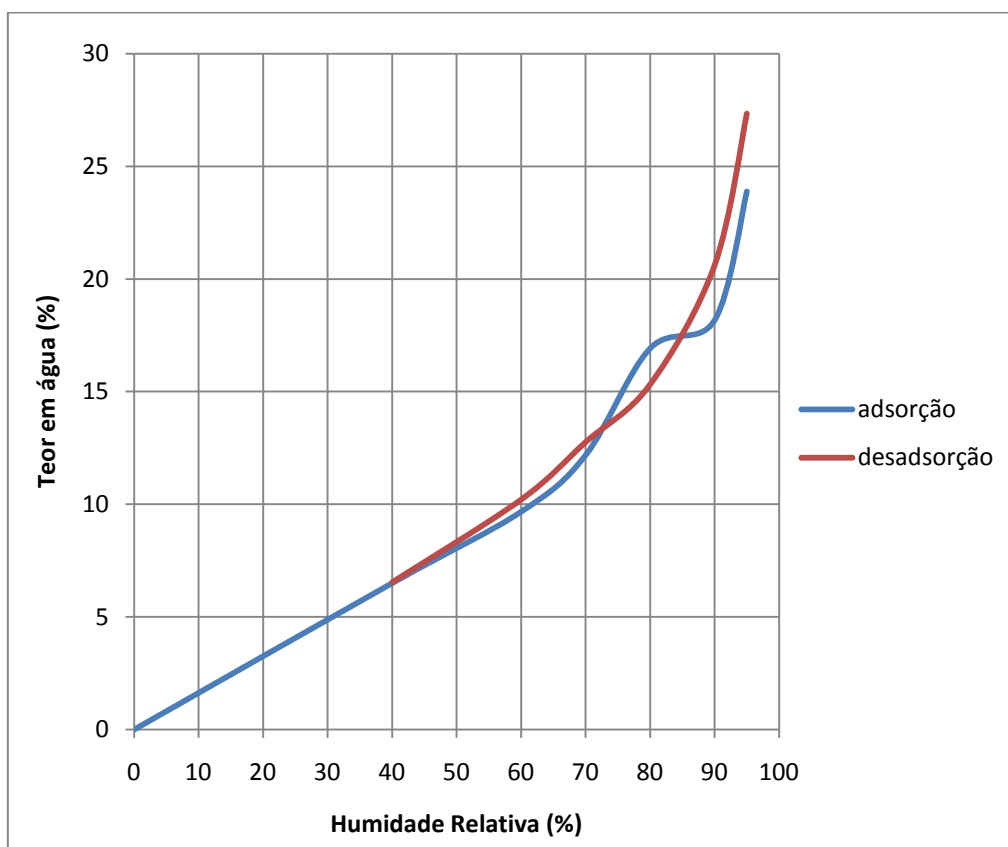


Gráfico 73 – Variação teor em água (madeira)

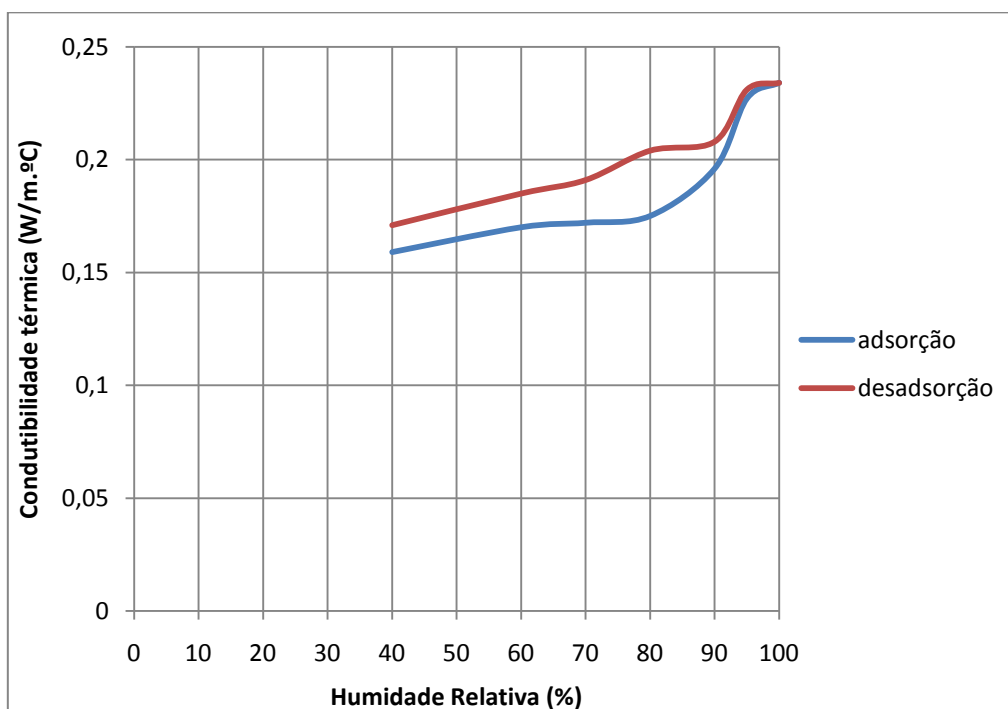


Gráfico 74 – Variação da condutibilidade térmica (madeira)

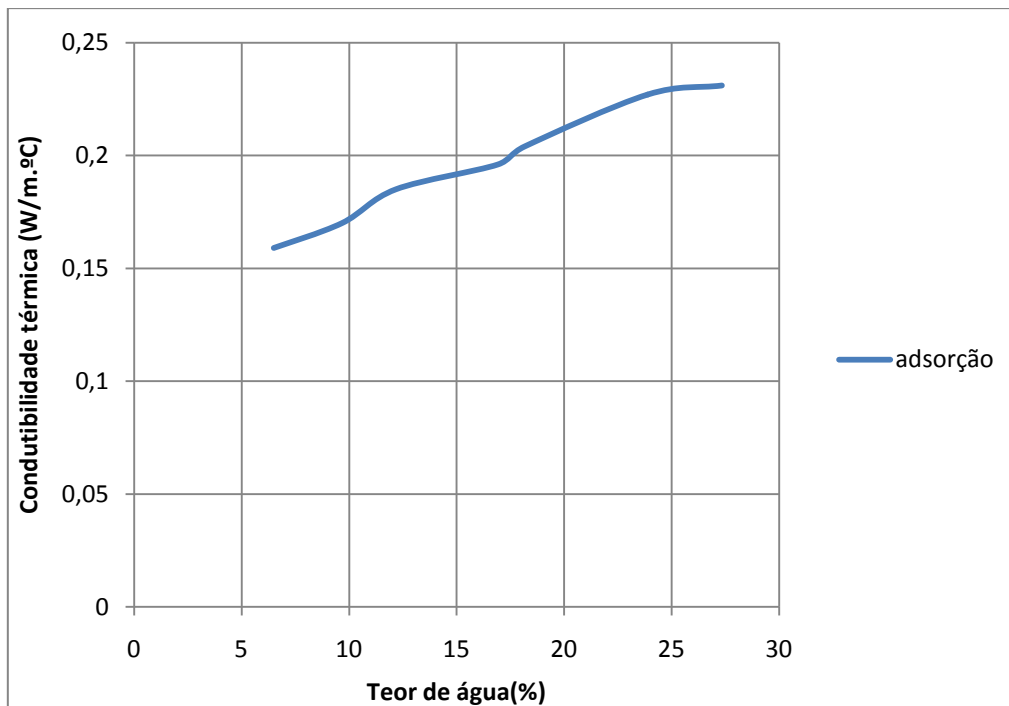


Gráfico 75 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (madeira)

## 4.12 Viroc

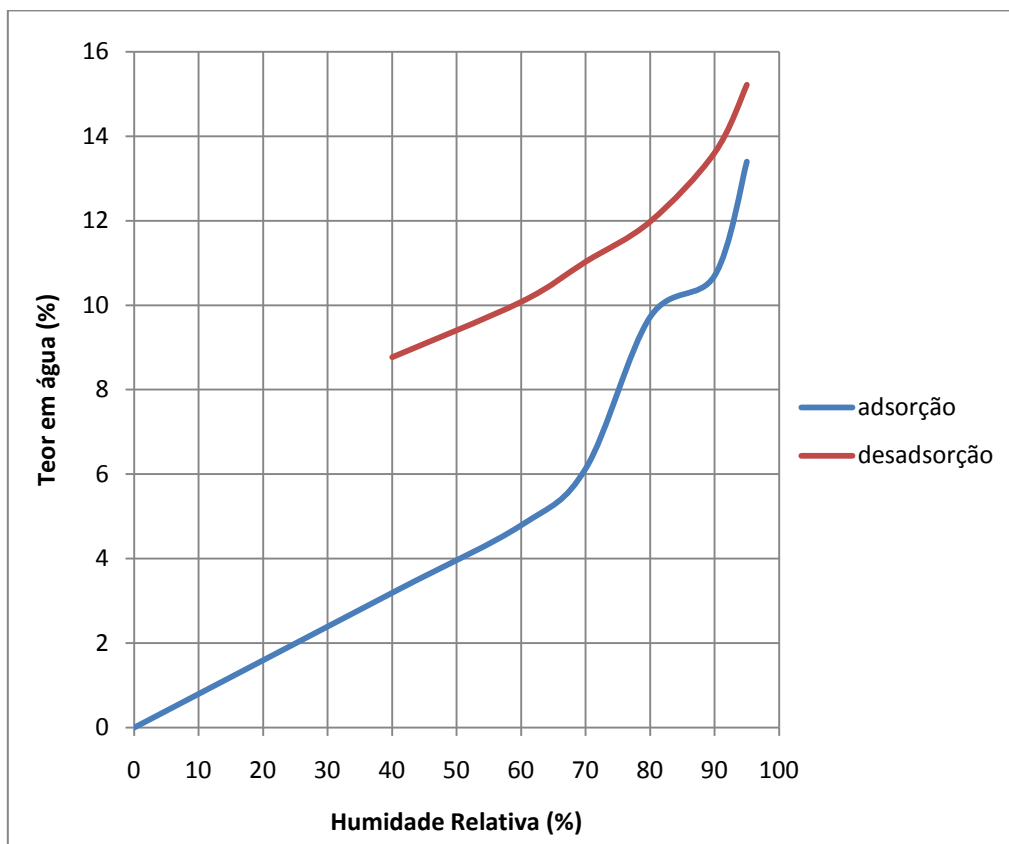


Gráfico 76 – Variação teor em água (viroc)

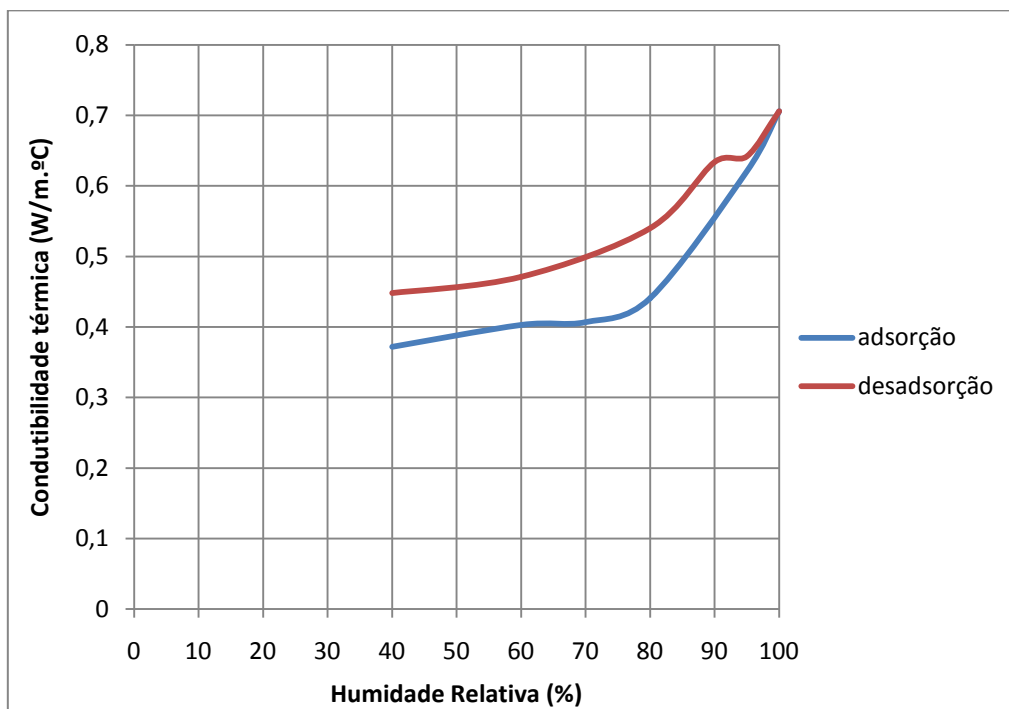


Gráfico 77 – Variação da condutibilidade térmica (viroc)

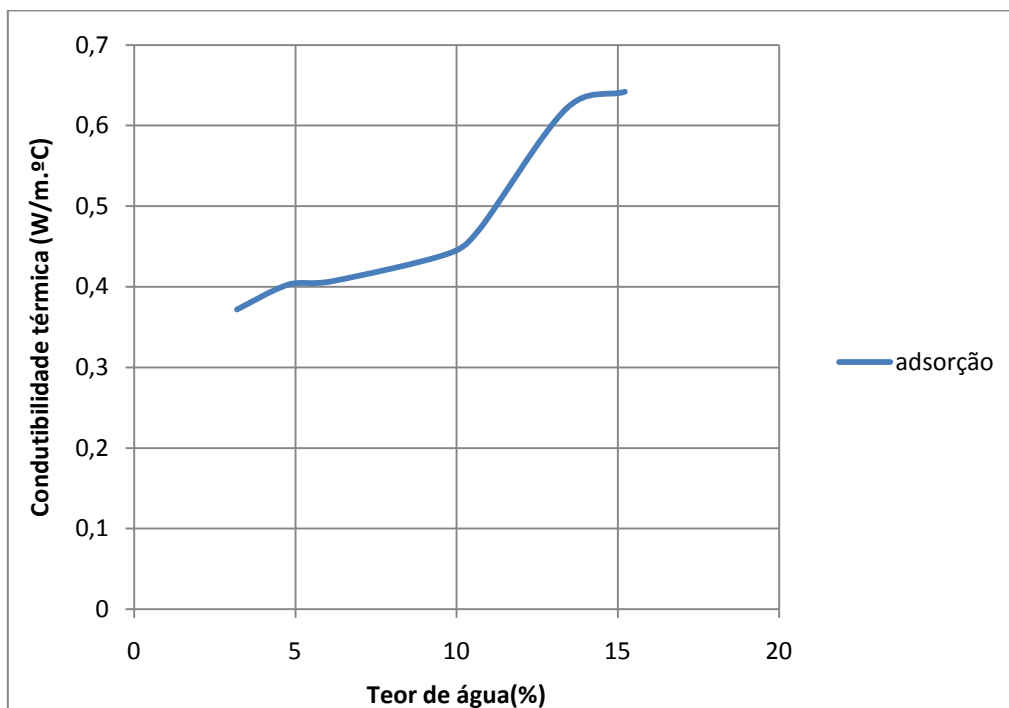


Gráfico 78 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água (viroc)

### 4.13 Gesso cartonado

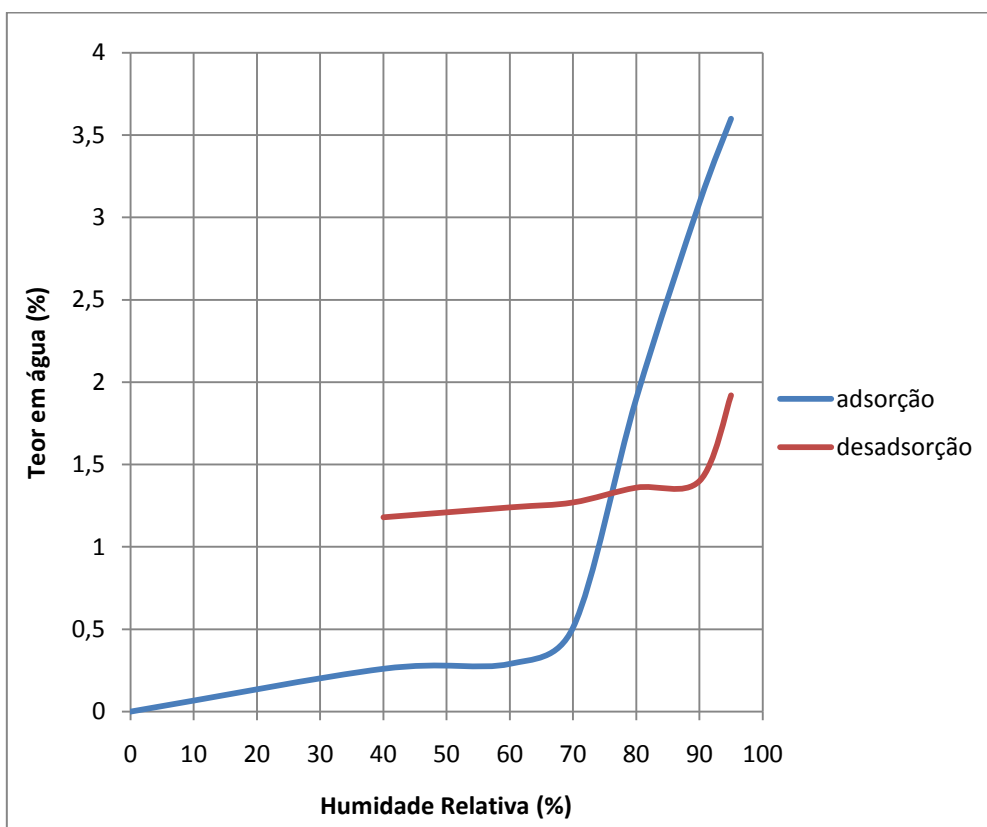


Gráfico 79 - Variação teor em água (gesso)

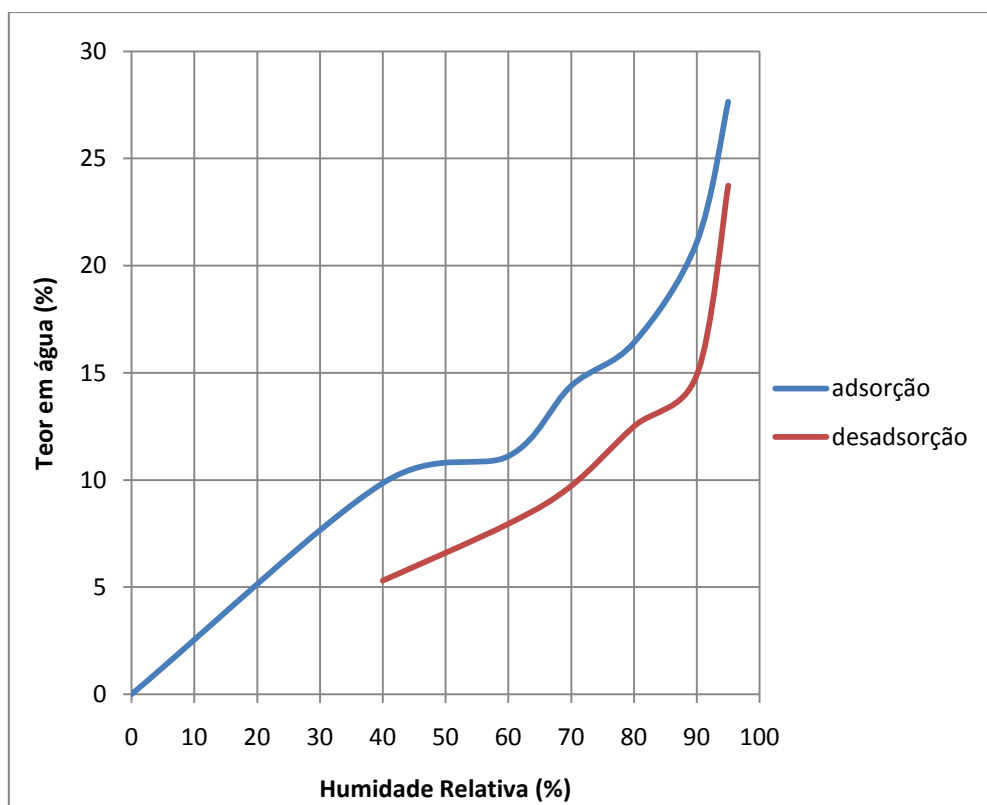


Gráfico 80 - Variação teor em água (cartão)

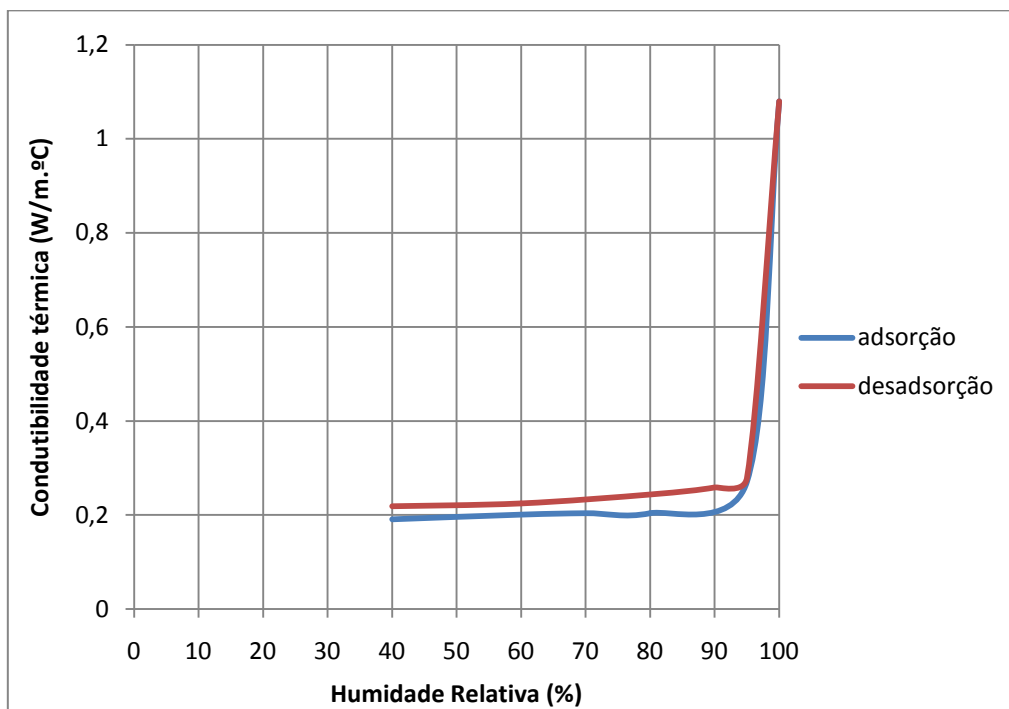


Gráfico 81 – Variação da condutibilidade térmica (gesso cartonado)

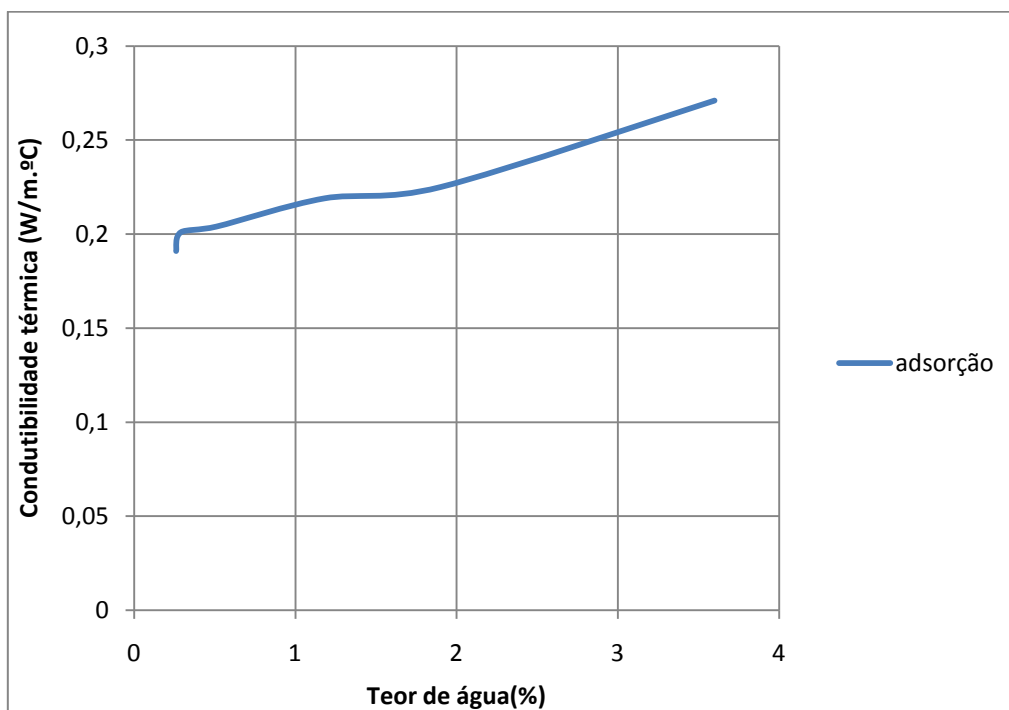


Gráfico 82 – Variação da condutibilidade térmica em função do teor de água do gesso



#### **4.13.1 Grupo: Materiais orgânicos**

De todos os materiais de construção ensaiados a madeira é o que regista o valor mais elevado de adsorção, atingindo cerca de 25% de teor em água (apesar de o efeito de histerese não ser significativo). Verifica-se ainda que a condutibilidade térmica da madeira varia de uma forma constante com o aumento do teor de água.

O Viroc tal como a madeira, adsorve bastante vapor de água (cerca de 14% de teor em água para 95% de humidade relativa), mas ao contrário da madeira apresenta um efeito de histerese bastante significativo. É ainda influenciado pelo teor em água, dado que o respectivo valor de condutibilidade térmica quase que duplica com o aumento do teor em água, em particular a partir dos 10% de teor de água.

Em relação ao gesso cartonado o estudo incidiu na avaliação distinta do comportamento do cartão e do gesso (de forma a compreender melhor como se comportam individualmente). Constata-se que o cartão adsorve mais vapor de água que o gesso, registando uma capacidade de retenção de água relativamente constante ao longo dos diversos níveis de humidade relativa ensaiados. Ao contrário do gesso que só a partir dos 70% tem um crescimento muito acentuado do seu teor em água. O que é também de ressaltar é o facto de o gesso apresentar um efeito de histerese significativo ao contrário do cartão.

Ainda sobre o gesso cartonado, a variação provocada pelo aumento do teor de água na condutibilidade térmica é pouco significativa. Uma vez que esta só aumenta de valor a partir dos 95% de humidade relativa, registando um crescimento muito acentuado da condutibilidade a partir do momento em que entra em contacto directo com água.

## **5 – Discussão de resultados**

### **5.1 Discussão da análise de resultados**

Após uma análise individual detalhada de cada material optou-se por efectuar um estudo comparativo entre os materiais de construção.

Esta discussão dos resultados vai ser realizada em grupos distintos de materiais de construção: um grupo de argamassas (que se divide em argamassas de cimento e bastardas), um grupo dos betões (inclui a argila expandida), um grupo dos isolantes térmicos (poliestireno moldado, extrudido e lã mineral), um grupo de revestimentos de pedra (granito, calcário e encarnado de negrais), um grupo de materiais orgânicos (madeira, viroc e gesso cartonado) e um grupo de material cerâmico (tijolo furado e cerâmica de forra).

#### **5.1.1 Argamassas - Considerações gerais para as argamassas**

O que se pode distinguir primeiramente da análise dos gráficos da variação do teor em água para as diversas argamassas é que demonstram comportamentos diferenciados consoante o seu traço volumétrico. Portanto pode-se afirmar que a capacidade de adsorver vapor de água depende da relação dos materiais constituintes das argamassas, já que uma variação dos traços volumétricos nas argamassas vai afectar a porosidade e o tipo de poros, alterando a capacidade das argamassas em adsorver vapor de água.

Em termos gerais as argamassas registam um crescimento do teor em água relativamente constante até aos 90% de humidade relativa, sendo que a partir desse mesmo nível as argamassas apresentam um crescimento (tanto do teor em água como de condutibilidade térmica) bastante expressivo. Conclui-se então que as argamassas registam dois tipos de comportamento à adsorção isotérmica, até aos 90% (constante) e após os 90% (crescimento acentuado). Constatando-se ainda que o aumento do teor em água numa argamassa influencia a respectiva variação da condutibilidade térmica.

No que diz respeito à influência da relação água/ligante na capacidade das argamassas em adsorver vapor de água, verifica-se que os valores de teor em água adsorvidos têm tendência para aumentar consoante a relação água/ligante for

igualmente aumentando (apesar de não ser uma constatação observada em todos os grupos de argamassas, em particular no grupo 1 a 3 e no grupo 13 a 15). Assim, em relação a este parâmetro as conclusões não são totalmente claras, apesar de em termos médios as argamassas irem aumentando gradualmente a sua capacidade de adsorver vapor de água com o aumento da relação água/ligante.

Na análise da variação da condutibilidade térmica com o aumento da relação água/ligante as conclusões ainda são menos evidentes que na análise anterior, apesar de apresentar uma ligeira tendência para aumentar o valor de condutibilidade térmica com o aumento da relação água/ligante.

### **Argamassas de cimento**

Para as argamassas de cimento comprova-se que quanto maior for a percentagem de cimento numa argamassa, maior será a sua capacidade de adsorver vapor de água e maior será o seu efeito de histerese. Esta constatação vem acentuar o efeito da formação dos anteriormente referidos poros de “tinteiro” nas pastas de cimento (ver capítulo 2).

Ao compararmos as argamassas com menor percentagem de cimento com as de maior, verifica-se que a capacidade de adsorver vapor de água é reduzida para cerca de metade, mas continuando a apresentar efeitos de histerese significativos.

Confirma-se igualmente que quanto maior a percentagem de cimento numa argamassa de cimento, maior será o seu valor de condutibilidade térmica. Uma vez que quanto maior a percentagem de cimento, maior o teor em água e por consequência maior o valor de condutibilidade.

### **Argamassas bastardas**

Em relação à capacidade de adsorver vapor de água não se obtém qualquer conclusão quanto à percentagem de cal numa argamassa bastarda, visto apresentarem em termos médios valores de adsorção de teor em água muito semelhantes independentemente do seu traço volumétrico. Nota-se ainda que quanto maior for a percentagem de cimento numa argamassa bastarda maior será o seu respectivo efeito de histerese (tal como nas argamassas de cimento).

Constata-se que são as argamassas com maior percentagem de cimento ou de cal, dentro do espectro estudado das argamassas bastardas, que registam os maiores valores de condutibilidade térmica, neste caso as argamassas 10 e 18.

Da análise feita nesta dissertação verifica-se que em muitos dos gráficos das argamassas bastardas não se apresenta o efeito de desadsorção, isto deve-se ao facto de ao saturar-se estas argamassas ser criada uma fina camada na superfície da água (que se julga ser carbonato de cálcio), que se irá perder no processo de retirar a água dos provetes após imersão em água durante 7 dias. Os dados da desadsorção não são apresentados porque não foram considerados credíveis, uma vez que apresentavam valores negativos de teor em água.

Estas perdas de massa podem ser uma das razões dos efeitos de histerese nas argamassas bastardas não serem significativos, com excepção da argamassa 10 (que é precisamente a que possui maior percentagem de cimento). Assim, conclui-se que a percentagem de cimento numa argamassa é fundamental no registo do efeito de histerese.

### **5.1.2 Restantes materiais**

#### **Grupo: Betões e argila expandida**

Da análise dos resultados da variação do teor em água dos vários betões estudados verifica-se que têm um comportamento similar à adsorção isotérmica. Dos gráficos resultantes da variação do teor em água nota-se um ligeiro abrandamento do crescimento do teor em água nos 80% de humidade relativa, isto deve-se possivelmente a uma mudança de câmara climática que pode ter provocado este ligeiro abrandamento.

Constata-se ainda que nos betões o aumento do teor em água provoca pouca variação na condutibilidade térmica. Mesmo após imersão em água o comportamento térmico do betão mantém-se relativamente inalterável.

Quanto à influência da classe dos betões, observa-se que quanto maior a classe do betão, maior será o valor de condutibilidade térmica atingido, apesar de não influenciar significativamente a capacidade de adsorver vapor de água.

A argila expandida por seu turno atinge cerca de metade do valor do teor em água dos betões ensaiados, mas apresentando um efeito de histerese semelhante. Comprova-se o que seria esperado em relação ao melhor comportamento térmico dos

blocos em argila expandida (em comparação com o betão), mas verifica-se igualmente que em contacto com água a argila expandida altera significativamente a sua resistência térmica (atingindo quase o dobro da condutibilidade comparada com a condutibilidade em estado seco, apesar de esta ser mesmo assim em valor absoluto muito menor comparada com o betão).

Concluindo-se então sobre este grupo que o betão normal apesar de adsorver muito vapor de água não altera consideravelmente as suas características térmicas, ao contrário da argila expandida que adsorve menos vapor de água, mas que é mais influenciada pelo aumento do respectivo teor de água.

### **Grupo: Isolantes térmicos**

Para os dois poliestirenos ensaiados (EPS e XPS) a adsorção praticamente só se observa entre os 0% e os 40% de humidade relativa (fase muito seca) e após os 90%. O que significa que nos níveis mais correntes de humidade relativa (entre 40% e 90%) os poliestirenos não adsorvem vapor de água.

Já a lã mineral apesar de ser dos três isolantes térmicos o que adsorve menos vapor de água, é o que apresenta uma variação mais significativa da condutibilidade térmica com o aumento do teor de água. O que comprova os poliestirenos (tanto o moldado como o extrudido) como melhores isolantes térmicos em relação à influência do teor em água, uma vez que são os que melhor mantêm as suas características.

Em relação à comparação entre os dois poliestirenos verifica-se que o poliestireno extrudido apresenta o menor valor de condutibilidade térmica, mas igualmente apresenta maior variação que o moldado. Constatando-se das diferenças dos dois poliestirenos que não são suficientes para se tirar uma conclusão definitiva sobre qual apresenta melhor comportamento térmico à adsorção isotérmica.

### **Grupo: Revestimentos de pedra**

Da análise dos resultados da variação do teor em água das várias pedras estudadas observa-se que têm um comportamento similar à adsorção isotérmica (adsorvem pouco vapor de água), apesar de o granito adsorver mais vapor de água que os calcários.

Constata-se ainda que em relação à influência do teor de água na variação da condutibilidade térmica, o granito revelou-se uma pedra de melhor comportamento térmico para revestimento exterior. Não apresentando uma variação significativa da respectiva condutibilidade térmica com o aumento do teor de água (ao contrário dos calcários).

### **Grupo: Materiais orgânicos**

O que se verifica primeiramente da análise do teor em água dos diversos materiais de construção é que os materiais que adsorvem mais vapor de água são os que possuem madeira na sua constituição (madeira de pinho e Viroc).

A madeira comprova-se portanto como um material bastante higroscópico, uma vez que é dos materiais ensaiados o que regista o maior valor de teor em água, apesar de não apresentar um efeito de histerese significativo.

O que é interessante de se notar na madeira é que apesar de o teor em água influenciar a respectiva condutibilidade térmica, esta varia relativamente pouco em relação ao que varia o respectivo teor em água, fazendo da madeira um material de grande utilidade na construção civil (visto que consegue variar o seu valor de teor em água sem perder as suas características fundamentais, mesmo após imersão em água).

O Viroc é dos materiais com madeira na sua constituição o que apresenta o maior efeito de histerese, isso pode ocorrer devido à presença de cimento na sua constituição (o que vem reforçar novamente o efeito dos poros de "tinteiro" nas pastas de cimento).

Dos revestimentos estudados o Viroc é o que apresenta o valor mais baixo de condutibilidade térmica de todos os revestimentos exteriores analisados, tornando-o o revestimento exterior de utilização mais atraente.

Em relação ao gesso cartonado constata-se que o gesso e o cartão apresentam comportamentos distintos à adsorção isotérmica (apesar dos dois adsorverem bastante vapor de água, o cartão adsorve bastante mais que o gesso). Verifica-se ainda um efeito de histerese no gesso, que seria ainda maior se não ocorresse perda de massa (tal como ocorrido nas argamassas bastardas).

Já o comportamento térmico do gesso cartonado é bastante peculiar, uma vez que a condutibilidade térmica deste mantém-se praticamente inalterável até ao momento em que é imerso em água, provocando um crescimento bastante significativo da respectiva condutibilidade. O que significa que o gesso cartonado é um material que apresenta um

bom comportamento térmico, excepto se contactar com água (perdendo as suas características de resistência térmica).

### **Grupo: Materiais cerâmicos**

Dos materiais cerâmicos (tijolo e forra) constata-se que apesar de adsorverem muito pouco teor em água, este cresce bastante a partir dos 90% de humidade relativa, apresentando um ligeiro efeito de histerese. Verificando-se em relação à variação da condutibilidade térmica que este grupo atinge valores muito elevados somente quando os provetes em questão estão em contacto com água.

Em conclusão, este grupo de materiais perde as suas características de resistência térmica ao contactar com água, o que reforça a importância de garantir a estanqueidade no interior das paredes, evitando a deterioração e o aumento exponencial da condutibilidade térmica que o teor de água provoca nos materiais de construção, em particular os materiais cerâmicos.

## **5.2 - Análise das curvas higroscópicas através de expressões matemáticas**

Nos últimos anos foram desenvolvidas diversas expressões matemáticas que tentam definir as curvas higroscópicas dos materiais de construção. Optou-se por estudar as expressões matemáticas referidas por Hens [8] e compará-las com as curvas higroscópicas resultantes dos dados experimentais desta dissertação.

Conhecidos os dados experimentais pode-se determinar os coeficientes específicos de cada material na expressão geral (em baixo indicada), permitindo determinar as curvas higroscópicas de modo analítico. Para tal, efectuaram-se regressões não-lineares utilizando o programa de software "TableCurve2D".

### 5.2.1 Expressão geral [8]

$$(4) \quad Wh = a * \left(1 - \frac{\ln \Phi}{b}\right)^{-\frac{1}{c}}$$

Para:  $0,2 \leq \Phi \leq 0,98$

#### Simbologia

$\rho$  – volume específico (kg/m<sup>3</sup>)

$\Phi$  – humidade relativa

$W_h$  – teor de água (kg/m<sup>3</sup>)

a,b,c – constantes específicas de cada material

### 5.2.2 Betão normal

Curvas higroscópicas [8]:

$$\text{Adsorção: } Wh = 147,5 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,0453}\right)^{-\frac{1}{1,67}} \quad \text{Desadsorção: } Wh = 147,5 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,570}\right)^{-\frac{1}{0,64}}$$

Curvas higroscópicas experimentais (Betão 2):

$$\text{Adsorção: } Wh = 91,002 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{17,248}\right)^{-\frac{1}{0,0363}} \quad \text{Desadsorção: } Wh = 94,017 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{1,911}\right)^{-\frac{1}{0,864}}$$

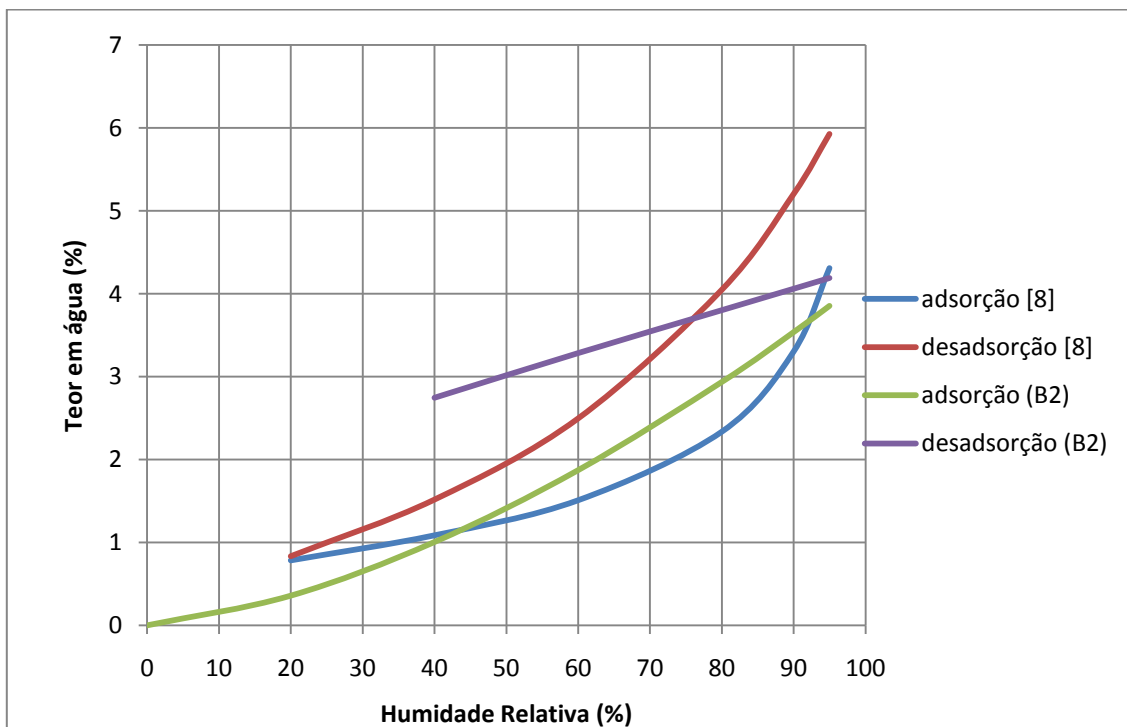


Gráfico 83 – Comparação das expressões matemáticas do teor em água (Betão normal)



## Discussão (Betão)

Da comparação das curvas higroscópicas atesta-se que estas não diferem significativamente, em particular as curvas de adsorção quase não apresentam diferenças.

Já as curvas de desadsorção apresentam algumas discrepâncias (especialmente para valores baixos de humidade relativa) mas não muito significativas.

### 5.2.3 Betão leve

Curvas higroscópicas betão leve [8]:

$$\text{Adsorção: } Wh = 110 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,0277}\right)^{-\frac{1}{2,14}} \quad \text{Desadsorção: } Wh = 110 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,0221}\right)^{-\frac{1}{2,91}}$$

Curvas higroscópicas experimentais (Bloco argila expandida):

$$\text{Adsorção: } Wh = 42,773 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{3,444}\right)^{-\frac{1}{0,1287}} \quad \text{Desadsorção: } Wh = 201,89 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,00069}\right)^{-\frac{1}{2,86}}$$

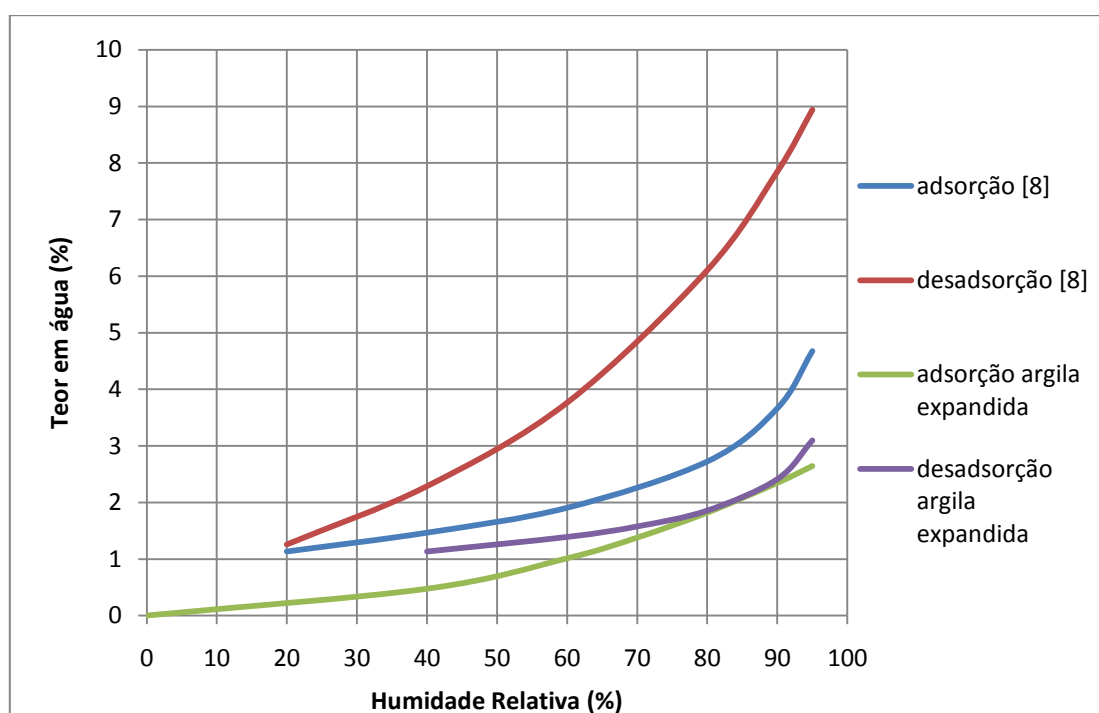


Gráfico 84 – Comparação das expressões matemáticas do teor em água (argila expandida)

### Discussão (argila expandida)

Da observação das curvas higroscópicas, verifica-se que as expressões resultantes dos dados experimentais não representam com grande rigor o fenómeno de desadsorção.

Já as curvas de adsorção apresentam bastantes semelhanças (especialmente a forma da curva, registando uma diferença constante de 1% em todos os níveis de humidade relativa).

### **5.2.4 Argamassas**

Curvas higroscópicas [8]:

$$\text{Adsorção: } Wh = 283 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,029}\right)^{-\frac{1}{1,39}} \quad \text{Desadsorção: } Wh = 300 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,061}\right)^{-\frac{1}{1,77}}$$

Curvas higroscópicas experimentais (Argamassa 1):

$$\text{Adsorção: } Wh = 54,809 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,0703}\right)^{-\frac{1}{1,771}} \quad \text{Desadsorção: } Wh = 55,213 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{7,294}\right)^{-\frac{1}{0,410}}$$

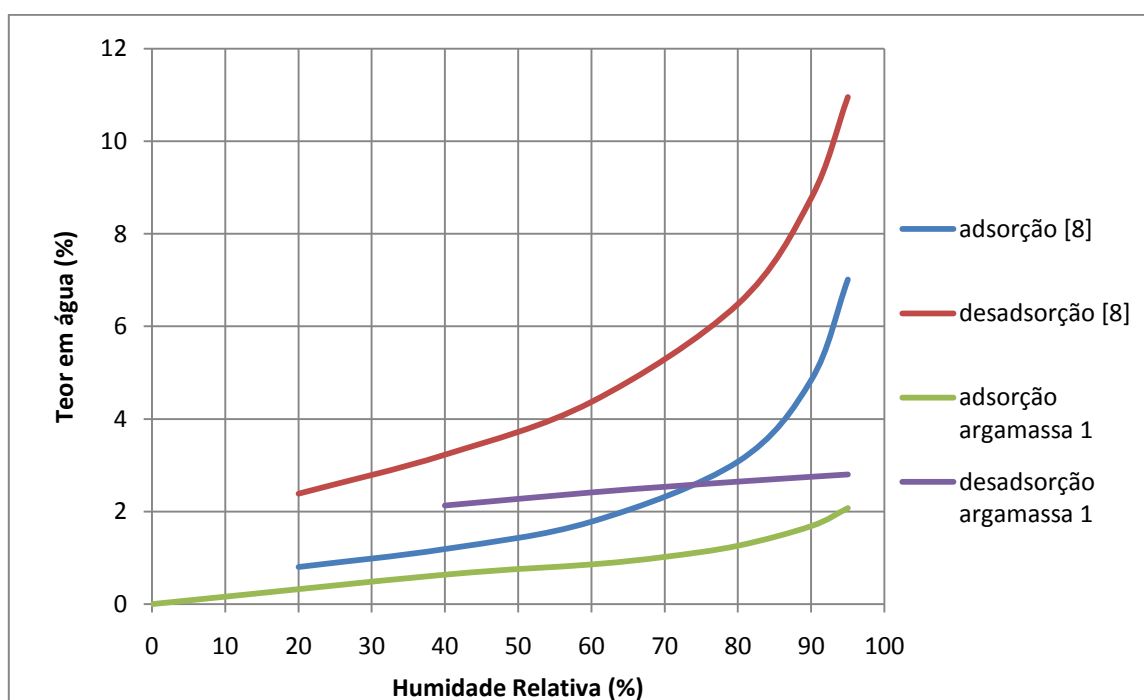


Gráfico 85 – Comparação das expressões matemáticas do teor em água (argamassa 1)

## **Discussão (argamassas)**

As curvas experimentais apresentam diferenças significativas em comparação com as de Hugo Hens, constatando-se que a curva da desadsorção experimental não representa da melhor forma o comportamento higroscópico das argamassas (em particular para níveis elevados de humidade relativa).

Em relação à curva de adsorção as discrepâncias são menos significativas, só se tornando evidentes a partir dos 70% de humidade relativa.

### **5.2.5 Tijolo**

Curvas higroscópicas [8]:

$$\text{Adsorção: } Wh = 200 \left( 1 - \frac{\ln \Phi}{1,46 \cdot 10^{-4}} \right)^{-\frac{1}{1,59}}$$

Curvas higroscópicas experimentais (Tijolo furado):

$$\text{Adsorção: } Wh = 243,544 \left( 1 - \frac{\ln \Phi}{3,444} \right)^{-\frac{1}{1,731}}$$

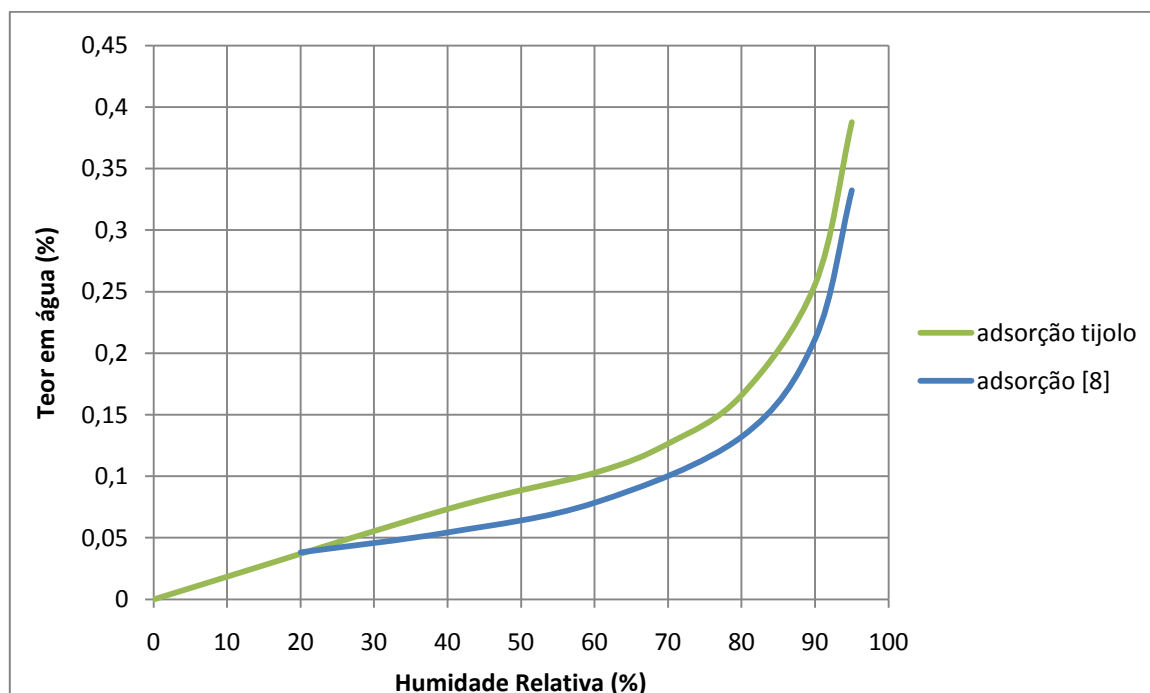


Gráfico 86 – Comparação das expressões matemáticas do teor em água (tijolo furado)

## **Discussão (tijolo)**

Da comparação das curvas higroscópicas de adsorção observa-se que estas são praticamente coincidentes, representando com elevada certeza o comportamento higroscópico do tijolo cerâmico furado.

## **5.2.6 Madeira**

Curvas higroscópicas [8]:

$$\text{Adsorção: } Wh = 100 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,642}\right)^{-\frac{1}{0,64}} \quad \text{Desadsorção: } Wh = 120 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,248}\right)^{-\frac{1}{1,22}}$$

Curvas higroscópicas experimentais (Pinho Bravo):

$$\text{Adsorção: } Wh = 134,787 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,319}\right)^{-\frac{1}{0,957}} \quad \text{Desadsorção: } Wh = 192,93 \left(1 - \frac{\ln \Phi}{0,0687}\right)^{-\frac{1}{1,567}}$$

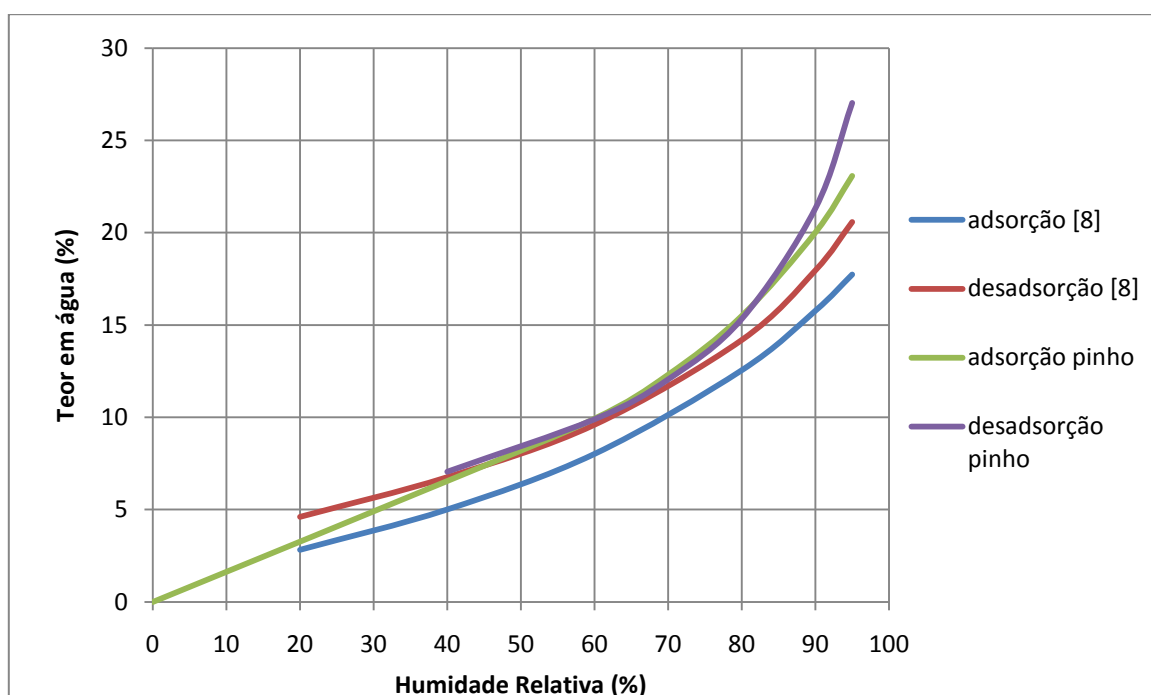


Gráfico 87 – Comparação das expressões matemáticas do teor em água (pinho)

## **Discussão (madeira)**

Tal como na comparação das curvas anteriores, verifica-se que estas são praticamente coincidentes (em particular a de desadsorção). Existindo uma pequena divergência na curva de adsorção, mas pouco significativa, representando com bastante rigor o comportamento higroscópico da madeira

### 5.2.7 Gesso cartonado

(Nota: como foram analisados separadamente o cartão do gesso, optou-se por atribuir para o comportamento higroscópico combinado do gesso cartonado, 90% de gesso e 10 % de cartão)

Curvas higroscópicas [8]:

$$\text{Adsorção: } Wh = 150 \left( 1 - \frac{\ln \Phi}{2,99 \cdot 10^{-4}} \right)^{-\frac{1}{4,81}} \quad \text{Desadsorção: } Wh = 150 \left( 1 - \frac{\ln \Phi}{0,026} \right)^{-\frac{1}{7,86}}$$

Curvas higroscópicas experimentais (Gesso cartonado):

$$\text{Adsorção: } Wh = 80,595 \left( 1 - \frac{\ln \Phi}{0,2256} \right)^{-\frac{1}{0,7305}} \quad \text{Desadsorção: } Wh = 156,77 \left( 1 - \frac{\ln \Phi}{0,00104} \right)^{-\frac{1}{2,859}}$$

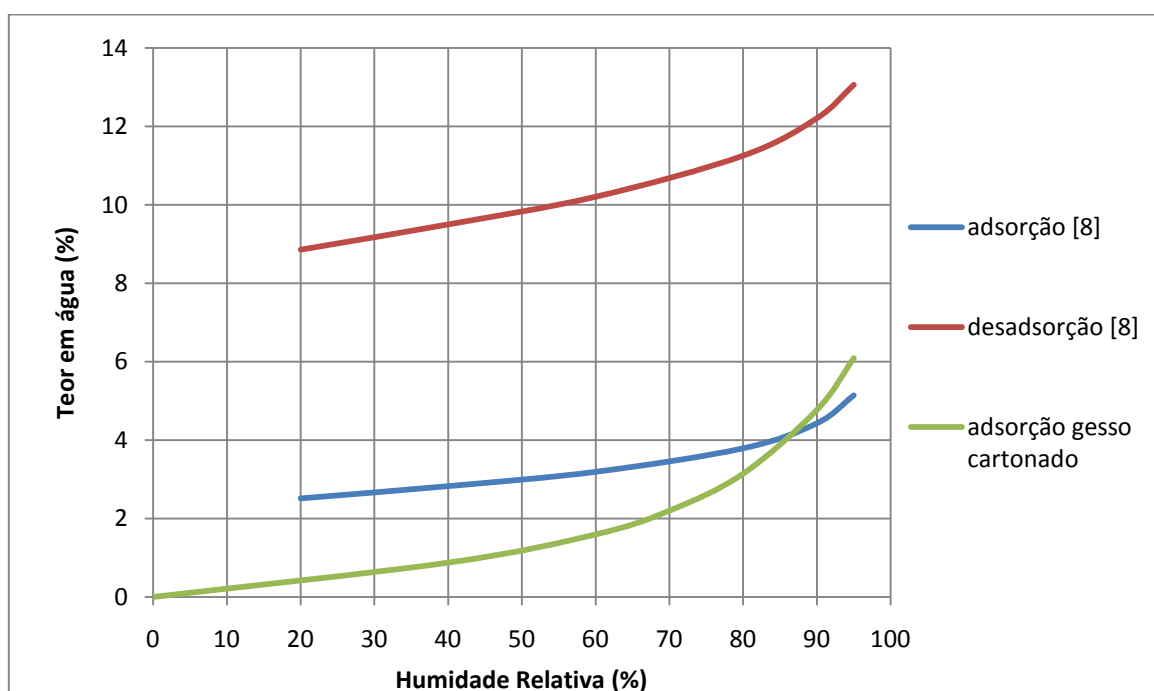


Gráfico 88 – Comparação das expressões matemáticas do teor em água (gesso cartonado)

### Discussão (gesso cartonado)

Não foi apresentada a curva de desadsorção experimental porque foi considerada não representativa do seu comportamento real (já que chegava a ser menor à de adsorção).

Em relação à curva de adsorção constata-se que esta apresenta algumas divergências, em particular para valores baixos de humidade relativa, mas quando elevamos os níveis de humidade relativa as curvas chegam a cruzar-se.

### 5.2.8 Calcário

Curvas higroscópicas [8]:  $0,1 \leq \Phi \leq 0,9$  (valores tabelados)

Curvas higroscópicas experimentais (Calcário):

$$\text{Adsorção: } Wh = 10,319 \left( 1 - \frac{\ln \Phi}{0,0811} \right)^{-\frac{1}{1,461}}$$

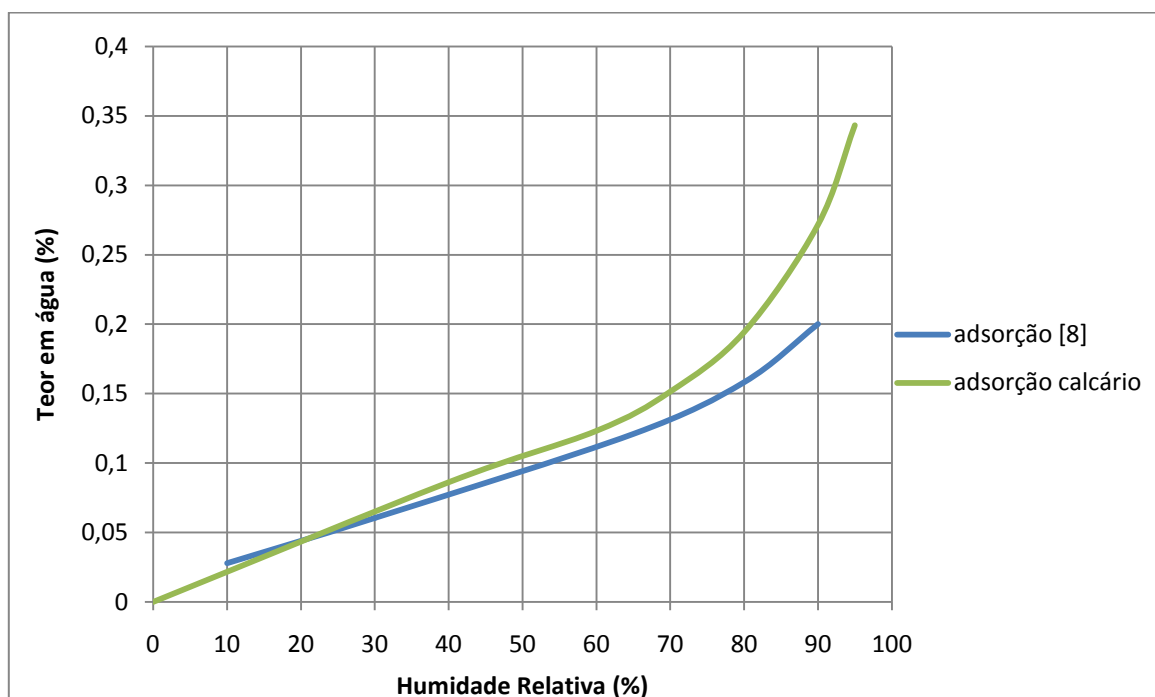


Gráfico 89 – Comparação das expressões matemáticas do teor em água (calcário)

### Discussão (calcário)

Da comparação das curvas higroscópicas de adsorção atesta-se que estas são praticamente coincidentes.

Assim, conclui-se que as expressões resultantes dos dados experimentais representam com rigor o comportamento higroscópico da pedra calcária.

## 5.3 Comparação de dados do programa Wufi

O Wufi é um programa informático de cálculo combinado de transferência de calor e de humidade em materiais que compõem uma parede de um edifício, utilizando dados

recolhidos do exterior bem como de testes de laboratório. No quadro 6 será realizada uma comparação de dados experimentais com os dados retirados do programa Wufi.

Nota: para o estudo das argamassas optou-se por argamassas de um traço volumétrico intermédio (de forma não serem argamassas extremas).

**Quadro 6 - Comparação de dados de condutibilidade térmica do programa Wufi**

Materiais	teor em água(%)	$\lambda$ (W/m°C)	$\lambda$ Wufi (W/m°C)	Diferença (%)
Argamassa cimento 5	seco	1,14	1,2	-5
	saturado	2,41	3	-19,7
Argamassa bastarda 13	seco	1,05	0,8	31,3
	saturado	2,09	1,6	30,6
Betão 3	seco	1,66	1,6	3,7
	saturado	2,53	2,64	-4,2
EPS	seco	0,0389	0,04	-2,8
	saturado	0,0436	0,049	-11
XPS	seco	0,0368	0,03	22,7
	saturado	0,0445	0,039	14,1
Lã mineral	seco	0,0418	0,04	4,5
	saturado	0,0526	0,049	7,3
Gesso cartonado (gesso)	seco	0,191	0,2	-4,5
	saturado	1,08	1,42	-23,9
Madeira	seco	0,159	0,13	22,3
	saturado	0,234	0,25	-6,4
Calcário	seco	2,71	2,25	20,4
	saturado	3,08	3,2	-3,8
Encarnado Negrais	seco	2,32	2,25	3,1
	saturado	3,18	3,2	-0,6

Como o programa Wufi não dispõe de todos os materiais de construção estudados nesta dissertação, optou-se também por uma comparação com valores retirados das fichas técnicas dos materiais que as possuem ou com valores retirados do ITE 50.

**Quadro 7 - Comparação de dados de condutibilidade térmica dos restantes materiais**

Materiais	$\lambda$ experimental (W/m°C)	$\lambda$ (W/m°C)	Diferença (%)	Entidade
Tijolo furado	0,37	0,35	5,7	Ficha técnica
Bloco argila expandida	0,457	0,54	-15,4	Ficha técnica
Viroc	0,288	0,23	25,2	Ficha técnica
Forra	0,828	0,77	7,5	ITE 50
Granito	2,8	2,8	0	ITE 50

### 5.3.2 Discussão da comparação de dados com o programa WUFI

O que se constata da comparação de dados recolhidos experimentalmente pelo ISOMET com os dados fornecidos pelo programa Wufi é que em termos gerais não diferem significativamente, já que se considerou que discrepâncias até 30% do seu valor podem ser causadas por diferenças nas características dos materiais em comparação (por exemplo o volume específico).

Assim, pode-se concluir desta comparação de dados que os valores de condutibilidade térmica retirados pelo ISOMET dos materiais de construção ensaiados, estão dentro do espectro de valores normalmente aceites pela comunidade científica. Mas tendo sempre em consideração (em particular para os casos dos provetes considerados saturados) que os valores apresentados pelo ISOMET têm um erro de leitura associado (ver desenvolvimento experimental).

## 5.4 Verificação da influência do teor de água no coeficiente de transmissão térmica

Com o objectivo de verificar a influência do teor em água no coeficiente de transmissão térmica  $U$ , decidiu-se estudar três casos distintos de paredes correntes, considerando-se uma condução unidireccional em regime permanente.

Apresenta-se de seguida o quadro 8 com a disposição dos materiais e respectivas espessuras dos três casos de parede em estudo.

**Quadro 8 - Materiais e respectivas espessuras dos tipos de paredes a estudar**

Caso	Disposição dos materiais e respectivas espessuras
1	Argamassa ext. ETICS (0,5cm) + Isolante térmico (4cm) + Betão (25cm) ou tijolo 22cm + Argamassa interior (1.5cm)
2	Revestimento ext.(variável) + Argamassa ext. (1,5cm) + Tijolo 15cm +caixa de ar (2,5cm) + Isolante térmico (4cm) + tijolo 11cm + Argamassa interior (1.5cm)
3	Madeira ext. (2cm) + caixa de ar (2,5cm) + Isolante (4cm) + Madeira int. (2cm) ou gesso cartonado (1,3cm)



Dos tipos de parede apresentados só no caso 2 será possível incorporar um revestimento exterior, que varia desde 2 cm para os revestimentos de pedra, 1 cm para o VIROC e 1,5 cm para a cerâmica de forra. É importante referir que no cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o caso 2 não se contabiliza o efeito do revestimento exterior, a não ser que esteja em causa a influência desse mesmo revestimento exterior.

Os valores representados no Quadro 9 apresentado de seguida, foram retirados do ITE 50 versão de 2006 do LNEC, e vão ser estes os valores a utilizar no cálculo dos coeficientes de transmissão térmica.

**Quadro 9 - Condutibilidade térmica dos materiais a estudar**

<b>Materiais</b>	<b>Condutibilidade térmica (W/m°C)</b>
XPS	0,037
EPS	0,037
Lã mineral	0,04
Argamassas bastardas	0,8
Argamassas de cimento	1,3
Calcário	2,3
Granito	2,8
Betão	1,65
Forra	0,77
Tijolo furado	0,34
Gesso cartonado	0,25
Madeira (pinho)	0,15
Viroc	0,23
Bloco argila expandida	0,46

**5.4.1 Exemplo de cálculo da resistência térmica de um tijolo furado 30x20x11 cm, assumindo que a espessura dos septos do material cerâmico é de 1cm.**

Solução: Considerando o tijolo colocado na forma usual, o fluxo de calor incidirá numa das faces de 30x20 cm<sup>2</sup>, atravessando o tijolo ao longo de um plano 20x11 cm<sup>2</sup>.



**Figura 20 - Tijolo cerâmico furado 30x20x11 cm**

Sendo  $\lambda$  tijolo = 0,34 W/m°C, verifica-se neste plano que se podem atravessar as duas seguintes zonas:

1. Zona maciça de material cerâmico

$$\text{Área} = (\text{comprimento} \times \text{espessura septo}) \times 5 = (0,30 \times 0,01) \times 5 = 0,015 \text{ m}^2$$

$$\text{Resistência térmica} = (\text{espessura} / \lambda) = (0,11 / 0,34) = 0,32 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

2. Zona mista de material cerâmico e espaços de ar

$$\text{Área} = (\text{dimensão vertical} - \Sigma \text{ septos}) \times \text{comprimento} = (0,20 - 0,05) \times 0,30 = 0,045 \text{ m}^2$$

$$\text{Resistência térmica material cerâmico} = (0,03 / 0,34) = 0,09 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\text{Resistência térmica ar} = (2 \times 4\text{cm}) = 0,36 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\text{Resistência térmica zona mista} = (0,09 + 0,36) = 0,45 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

O valor da Resistência térmica média de um tijolo cerâmico furado de dimensões 30x20x11 cm, será então:

$$R_t = \frac{(\text{Área zona maciça} \times R \text{ zona maciça} + \text{Área zona mista} \times R \text{ zona mista})}{(\text{Área zona maciça} + \text{Área zona mista})}$$

$$R_t = \frac{(0,015 \times 0,32 + 0,045 \times 0,45)}{(0,015 + 0,045)} = 0,42 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

Após a realização dos cálculos exemplificados anteriormente para tijolos de várias dimensões e para um bloco de betão leve em argila expandida de dimensões 50x20x14,5cm, retira-se os seguintes valores:

**Quadro 10 - Resistências térmicas a considerar**

Material	Largura (cm)	Resistência térmica (m <sup>2</sup> .°C)/W
Tijolo cerâmico furado	7	0,37
	11	0,42
	15	0,6
	22	0,81
Bloco betão leve	14,5	0,26

**5.4.2 Exemplo de cálculo do coeficiente de transmissão térmica U**, para o **caso 2** (visto ser o caso onde o cálculo é mais complexo).

Revestimento de Calcário (2cm) + Argamassa bastarda exterior (1,5cm) + Tijolo de 15 + caixa de ar (2,5cm) + EPS (4cm) + tijolo de 11 + Argamassa bastarda interior (1.5cm)

Considerando:  $R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\text{.°C)/W}$  e  $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{.°C)/W}$

$$\Sigma R_i = \frac{(\text{esp. calcário})}{(\lambda \text{ calcário})} + \frac{(\text{esp. argamassa})}{(\lambda \text{ argamassa})} + \frac{(\text{esp. EPS})}{(\lambda \text{ EPS})} + R_{\text{tijolo 15}} + R_{\text{tijolo 11}} + R_{\text{ar}}$$

$$\Sigma R_i = \frac{(0,02)}{(2,30)} + \frac{(0,015 \times 2)}{(0,8)} + \frac{(0,04)}{(0,04)} + 0,6 + 0,42 + 0,18 = 2,2375 \text{ m}^2\text{.°C /W}$$

Sendo:

$$U = \frac{1}{(R_{si} + \Sigma R_i + R_{se})}$$

O resultado do cálculo do coeficiente de transmissão térmica de uma parede dupla constituída pelos materiais referidos anteriormente é:

$$U = \frac{1}{(0,13 + 2,2375 + 0,04)} = 0,415 \text{ W/(m}^2\text{.°C)}$$

### 5.4.3 Cálculo da influência do teor de água no coeficiente de transmissão térmica

No Quadro 11 estuda-se a influência da variação do teor em água dos diversos materiais de construção no coeficiente de transmissão térmica de uma parede.

Para isso calculou-se para os 3 casos distintos de tipos de parede o respectivo valor de U seco (isto é, com valores retirados do ITE50) e posteriormente calculou-se um U novo (onde se altera somente a respectiva condutibilidade térmica do material em causa, mantendo os valores dos restantes materiais constituintes dessa mesma parede).

De forma a poder-se verificar como é que a variação do teor em água de um determinado material influencia o coeficiente de transmissão térmica de uma parede, vai-se utilizar a seguinte expressão:

$$(5) \Delta U (\%) = \frac{U - U_{\text{seco}}}{U_{\text{seco}}} \times 100$$

#### **NOTAS:**

- Os valores de condutibilidade térmica foram registados com o auxílio do ISOMET 2104 (o procedimento utilizado é explicado em detalhe no capítulo 4).
- Quando se define que o teor de água está saturado, isto significa que o material foi sujeito a 7 dias imerso em água.
- No estudo das argamassas e do betão optou-se por escolher os que apresentam maior variação dos valores de condutibilidade térmica.
- No caso 1 (ETICS), para as argamassas só se contabilizou as interiores, já que no caso de ETICS a argamassa exterior é uma argamassa especial de colagem e barramento com uma espessura de 0,5 cm e uma condutibilidade térmica de 0,54 W/m°C.

**Quadro 11 - Variação provocada pela variação do teor em água no coeficiente U**

Materiais	Teor em água (%)	Condutibilidade (W/m°C)	Caso 1 Δ U (%)	Caso 2 Δ U (%)	Caso 3 Δ U (%)
Argamassa cimento 2	1	2,55	0,43	0,46	-
	2	3	0,49	0,53	-
	saturado	4,23	0,6	0,65	-
Argamassa bastarda 18	0,5	1,1	0,38	0,41	-
	1	1,26	0,51	0,55	-
	2	1,8	0,78	0,84	-
	Saturado	3,09	1,08	1,17	-

**Quadro 11 - Variação provocada pela variação do teor em água no coeficiente U**

Materiais	Teor em água (%)	Condutibilidade (W/m°C)	Caso 1 $\Delta$ U (%)	Caso 2 $\Delta$ U (%)	Caso 3 $\Delta$ U (%)
Betão 3	1	1,66	0,07	-	-
	2	1,7	0,33	-	-
	3	1,8	0,95	-	-
	4	2	2,02	-	-
	saturado	2,53	4,09	-	-
Tijolo	0,1	0,37	1	1,06	-
	0,5	0,6	6,38	6,69	-
	saturado	1,35	11,11	12,08	-
EPS	0,5	0,0389	3,85	2,18	3,21
	1	0,0396	5,25	2,95	4,36
	saturado	0,0436	12,99	7,08	10,66
XPS	0,5	0,038	2,05	1,16	1,7
	1	0,041	8,06	4,45	6,62
	saturado	0,0445	14,78	7,95	12,02
Lã mineral	0,1	0,0418	3,34	1,83	2,74
	0,3	0,0502	17,97	9,28	14,37
	saturado	0,0526	21,89	11,12	17,4
Gesso cartonado (gesso)	0,5	0,191	-	-	-1,03
	2	0,204	-	-	-0,76
	3	0,279	-	-	0,35
	saturado	1,08	-	-	26,27
Madeira	6,5	0,159	-	-	0,94
	17	0,175	-	-	2,41
	25	0,227	-	-	5,93
	saturado	0,234	-	-	6,29
Bloco argila expandida	0,5	0,51	0,1	-	-
	2	0,836	3,22	-	-
	3	0,901	3,67	-	-
	saturado	0,996	4,12	-	-
Viroc	3	0,372	-	0,69	-
	9	0,441	-	0,86	-
	13	0,621	-	1,14	-
	saturado	0,706	-	1,22	-
Forra	0,1	0,828	-	0,06	-
	0,3	1,39	-	0,36	-
	saturado	2,07	-	0,51	-

**Quadro 11 - Variação provocada pela variação do teor em água no coeficiente U**

Materiais	Teor em água (%)	Condutibilidade (W/m°C)	Caso 1 $\Delta$ U (%)	Caso 2 $\Delta$ U (%)	Caso 3 $\Delta$ U (%)
Granito	0,1	2,8	-	0	-
	0,2	3,1	-	0,03	-
	saturado	3,36	-	0,05	-
Encarnado Negrais	0,1	2,52	-	-0,09	-
	0,2	2,67	-	-0,07	-
	saturado	3,18	-	-0,02	-
Calcário	0,1	2,71	-	0,05	-
	0,3	2,85	-	0,07	-
	saturado	3,08	-	0,09	-

#### 5.4.4 Discussão dos resultados da variação provocada pelo teor de água numa parede

##### Grupo: Argamassas

Verifica-se que a influência do teor em água nas argamassas é pouco significativa na variação do coeficiente de transmissão térmica. Constata-se que a argamassa de cimento que mais varia a sua condutibilidade (a argamassa 2) influencia menos o U da parede que a argamassa bastarda mais variável (a argamassa 10), apesar de a diferença ser pouco expressiva. Isto deve-se essencialmente à pouca espessura das argamassas (cerca de 1,5cm) que têm relativa pouca importância no total da espessura de uma parede. Outro factor interessante de observar é as argamassas terem a mesma influência no caso de ETICS (utilização das argamassas só no interior) bem como no caso de paredes duplas (utilização tanto no interior como no exterior).

##### Grupo: Betões e argila expandida

Do grupo dos betões apura-se que estes têm muito maior influência que o grupo anterior das argamassas (muito devido à sua espessura), apesar de também não ser

especialmente significativa a influência do teor em água na variação do coeficiente de transmissão térmica.

Constata-se ainda que a influência do teor em água no bloco de betão leve em argila expandida é semelhante à do betão normal para valores elevados de teor em água. Mas se observarmos para valores de teor em água cerca de 2%, verificamos que a argila expandida provoca uma variação já significativa no valor de  $U$ , ao contrário do betão.

O betão normal só a partir de valores superiores a 4% de teor em água é que influencia o  $U$ , notando-se que só aquando da sua saturação em água é que este se aproxima da influência que o betão leve promove. Isto significa que para o betão normal provocar uma variação significativa no coeficiente de transmissão térmica, este tem de entrar em contacto com água, ao contrário da argila expandida.

### **Grupo: Isolantes térmicos**

Relativamente a este grupo de materiais constata-se que tem uma importância fulcral no comportamento térmico das paredes, visto que como seria de esperar uma pequena variação do valor de condutibilidade térmica neste grupo de materiais influencia significativamente o  $U$  de uma parede.

Observa-se ainda que dos três isolantes térmicos estudados o que menos afecta o coeficiente de transmissão térmica ao contactar com água é o poliestireno expandido, seguido do poliestireno extrudido, sendo de assinalar que a lã mineral é a que mais influencia.

Apesar do poliestireno expandido ser dos três isolantes ensaiados o que provoca menor variação no coeficiente  $U$ , o aumento do respectivo teor de água influencia consideravelmente este mesmo coeficiente (1% de teor de água provoca uma variação de cerca de 5% no coeficiente de transmissão térmica).

Já o poliestireno extrudido apresenta um comportamento semelhante ao poliestireno expandido, com a diferença de ser mais expressivo, chegando a atingir valores de variação do coeficiente de transmissão térmica significativos (para valores de teor em água de 1%, chega a provocar variações de 8% no valor de  $U$ ).

Em relação à lã mineral, o aumento do seu teor em água influencia acentuadamente o coeficiente de transmissão térmica das paredes, chegando mesmo quando em contacto com água a atingir valores de variação de 20% no coeficiente de transmissão térmica.

Constata-se ainda que os isolantes térmicos têm maior influência no coeficiente de transmissão térmica quanto menor for a espessura da parede, uma vez que apresenta menor influência no caso da parede dupla. Concluindo-se, que as paredes perdem considerável resistência térmica se a água atingir o seu isolamento térmico.

### **Grupo: Revestimentos de pedra**

A variação do teor de água nos revestimentos de pedra é totalmente insignificante na variação do coeficiente de transmissão térmica de paredes, independentemente do tipo de pedra em causa.

### **Grupo: Materiais orgânicos**

A influência do teor em água do gesso cartonado no coeficiente de transmissão térmica é pouco expressiva até este ser imerso em água. Chegando a variação do valor de U a ser negativa, uma vez que o valor para a condutibilidade térmica do gesso cartonado seco retirado do ITE50 é superior ao registado neste estudo. E tal como as argamassas, uma placa de gesso cartonado apresenta pouca espessura (cerca de 13mm), o que fomenta pouca variação no valor de U.

Mas quando o gesso cartonado é considerado saturado, a influência que o teor de água promove é a máxima registada (26,3% no valor de U). Este facto relembra-nos da importância de garantir que não ocorra condensações ou outro tipo de manifestações de humidade, que provocam grandes alterações no comportamento térmico do gesso cartonado.

Já o Viroc regista uma influência do teor em água praticamente nula, visto que as placas de VIROC estudadas apresentam cerca de 1cm de espessura, o que acaba por ser irrelevante na verificação da influência do teor de água no coeficiente de transmissão térmica de uma parede.

Quanto à madeira, esta influencia o coeficiente de transmissão térmica (cerca de 6%) para valores elevados de teor em água (25%), para as construções leves em madeira. De ressaltar o facto do comportamento térmico da madeira em contacto directo com água ser relativamente semelhante ao comportamento desta para valores elevados de teor em água, o que indica que contactar com água não altera significativamente o comportamento térmico desta.



## **Grupo: Materiais cerâmicos**

Tal como verificado anteriormente a influência do teor em água no coeficiente de transmissão térmica depende da espessura dos materiais, logo a cerâmica de forra não influencia significativamente (tal como todos os revestimentos exteriores estudados nesta dissertação).

O tijolo cerâmico furado por outro lado, apesar de atingir valores relativamente baixos de teor em água, tem uma importância crucial no comportamento térmico das paredes duplas (o que seria de esperar, já que no fundo utiliza dois panos de alvenaria de tijolo) bem como no caso de ETICS (menos expectável mas demonstrativo da importância do tijolo no comportamento térmico de paredes).

Quando o tijolo é considerado saturado, este perde as características de resistência que o tornam um material de elevada importância na construção de edifícios, chegando a provocar variações na ordem dos 12% no coeficiente de transmissão térmica (o que é considerável). Isto demonstra a mesma importância referida anteriormente na realização das caleiras e das caixas de ar, no interior das paredes, de forma a evitar a presença de água.

## 6 - Conclusões

Feita a análise dos resultados relativos ao ensaio de adsorção isotérmica dos diversos materiais de construção objecto deste estudo, conclui-se que o incremento dos níveis de humidade relativa provoca um aumento no respectivo teor de água dos materiais, fomentando desta forma o aumento dos valores de condutibilidade térmica destes, actuando directamente no comportamento térmico dos edifícios.

No caso mais particular das argamassas verifica-se que apresentam comportamentos diferenciados consoante o seu traço volumétrico, concluindo-se que a capacidade de adsorver vapor de água depende da relação dos materiais constituintes das argamassas, dado que uma variação nos traços volumétricos das argamassas vai afectar a porosidade e o tipo de poros, alterando a capacidade destas em adsorver vapor de água. No que diz respeito à influência da relação água/ligante na capacidade em adsorver vapor de água, as argamassas registam uma tendência para irem aumentando gradualmente a sua capacidade de adsorver vapor de água com o aumento da relação água/ligante.

Para as argamassas de cimento comprova-se que quanto maior for a percentagem de cimento numa argamassa, maior será a sua capacidade em adsorver vapor de água e por consequência maior será o seu valor de condutibilidade térmica. Para além disso foi igualmente demonstrado que a percentagem de cimento numa argamassa é essencial no registo do efeito de histerese.

Em relação às argamassas bastardas, são as que contêm maior percentagem de cimento ou de cal, as que registam os maiores valores de condutibilidade térmica, embora não se tenha obtido qualquer conclusão definitiva quanto ao efeito da percentagem de cal na capacidade de adsorver vapor de água.

A variação do teor de água nas argamassas é pouco expressiva no coeficiente de transmissão térmica de uma parede, uma vez que apresentam pouca espessura em relação ao total da espessura das paredes estudadas.

Da análise dos gráficos que representam a variação do teor em água dos betões ensaiados, observa-se que quanto maior for a classe respectiva do betão maior será o valor de condutibilidade térmica atingido, apesar de a classe dos betões não influenciar a capacidade destes em adsorver vapor de água.

Quanto ao bloco em argila expandida, adsorve menos vapor de água em comparação com o betão normal, mas é mais influenciado pelo aumento do respectivo teor de água. Assim, para o betão normal provocar uma variação semelhante à da argila expandida no coeficiente de transmissão térmica de uma parede, o betão tem de estar

saturado, uma vez que o acréscimo de teor em água nos betões provoca pouca variação na sua condutibilidade térmica. O mesmo não se verifica com a argila expandida onde o aumento do teor em água influencia consideravelmente a sua resistência térmica, apesar de registar um valor de condutibilidade térmica inferior ao do betão.

Relativamente ao grupo dos isolantes térmicos constata-se que têm uma importância fulcral no comportamento térmico das paredes, visto que, como seria de esperar uma pequena variação do valor de condutibilidade térmica neste grupo de materiais influencia significativamente o valor do U de uma parede. Demonstra-se que os poliestirenos (expandido e extrudido) são melhores isolantes térmicos em relação à influência do teor em água na condutibilidade térmica, em comparação com a lã mineral, uma vez que mantêm melhor as suas características de resistência térmica com o aumento do teor em água.

Dos gráficos resultantes da variação do teor em água das pedras naturais observa-se que adsorvem muito pouco vapor de água, exibindo um comportamento similar à adsorção isotérmica, embora o granito se tenha revelado como a pedra com menor variação da condutibilidade térmica com o aumento do teor em água. De notar ainda que a influência do teor em água na variação do coeficiente de transmissão térmica de uma parede promovido pelas pedras naturais é totalmente insignificante.

Verifica-se também da análise do teor em água dos diversos materiais de construção que os materiais que adsorvem mais vapor de água são os que possuem madeira na sua constituição (madeira de pinho e Viroc). Portanto, a madeira constitui-se como um material de elevada higroscopicidade, uma vez que é dos materiais ensaiados o que regista o maior valor de teor em água, apesar de não apresentar nem um efeito de histerese considerável, nem uma variação muito significativa da sua condutibilidade térmica. Ao saturar a madeira em água, a sua resistência térmica é semelhante para valores elevados de teor em água, pelo que o seu contacto com água não altera significativamente o seu comportamento térmico.

Já o Viroc apresenta o valor mais baixo de condutibilidade térmica de todos os revestimentos exteriores ensaiados, demonstrando uma influência do teor em água no coeficiente de transmissão térmica praticamente nula. Manifesta ainda um efeito de histerese significativo. Isso pode ocorrer devido à presença de cimento na sua constituição (que vem reforçar o efeito dos poros de "tinteiro" nas pastas de cimento).

Em relação ao gesso cartonado constata-se que o gesso e o cartão apresentam comportamentos distintos relativamente à adsorção isotérmica (o cartão adsorve mais vapor de água que o gesso). Quanto à sua variação da condutibilidade térmica, esta mantém-se praticamente inalterável até atingir a saturação em água, provocando um aumento significativo da condutibilidade térmica, atingindo desta forma a máxima

influência de todos os materiais ensaiados no coeficiente de transmissão térmica de uma parede.

Do grupo de materiais cerâmicos verifica-se que atingem valores relativamente baixos de teor em água. Todavia, ao contactar com água este grupo de materiais perde as suas características de resistência térmica. Esta característica vem reforçar a importância de garantir a estanqueidade no interior das paredes, evitando a deterioração e o aumento exponencial da condutibilidade térmica que o teor de água provoca nos materiais de construção, em particular o tijolo cerâmico furado.

Assim, conclui-se que os materiais de construção têm uma extrema importância no comportamento térmico de um edifício, pois podem moderar ou atenuar a amplitude da humidade no interior dos edifícios e, por conseguinte, participar no melhoramento da qualidade do ar interior e na poupança da energia consumida pelos edifícios.

## **6.1 Desenvolvimentos futuros**

Com o objectivo de complementar a análise referente aos resultados experimentais, propõe-se determinar a capacidade de armazenar humidade na região de capilaridade, isto é, para níveis de humidade relativa superiores a 95% em condições de pressão

Para tal, sugere-se o estudo do método “pressure-plate”, que é o indicado para determinar o respectivo teor de água dos provetes saturados. Um provete alcança a saturação capilar quando atinge a capacidade máxima de conter água através da adsorção em condições de pressão normais.

É um método de ensaio que combina a pressão aplicada, a perda de massa e a altura da água, de modo a ser possível determinar as características porométricas dos provetes.

## Referências Bibliográficas

- [1] A.C. Fontes de Melo – Desenvolvimentos recentes em blocos de betão leve. Seminário sobre paredes de alvenaria, Porto, 2002
- [2] Ahs, Magnus – Sorption scanning curves for hardened cementitious materials. "Construction and building materials" volume 22 (2008) pp 2228–2234.
- [3] Aligizaki, Kalliopi – Pore structure of cement-based materials. Editora Taylor & Francis, 2006.
- [4] Assares Rodrigues, Daniel – Influência dos métodos de ensaio nas características de argamassas de cal aérea e hidráulica. Dissertação para obtenção grau de mestre. FCT-UNL, 2009.
- [5] ASTM International – Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials. Designation: C1498, 2004.
- [6] Bouny, V.; Perrin, B.; Chemloul, L. – Détermination expérimentale des propriétés hydriques des pâtes de ciment durcies-Mise en évidence des phénomènes d'hystérésis. "Materials and structures" volume 30 (1997) pp 340-348.
- [7] Espinosa, R.; Franke, L. – Influence of the age and drying process on pore structure and sorption isotherms of hardened cement. "Cement and concrete research" volume 36 (2006) pp 1969– 1984.
- [8] Hens, Hugo – Applied building physics. Editora Ernst & Sohn, 2010.
- [9] Henriques, Fernando M. A. – Humidade em paredes. Colecção edifícios nº1, 4ª edição, LNEC. Lisboa, 2007
- [10] Johannesson, Bjorn; Janz, Marten – Test of four different experimental methods to determine sorption. "Journal of materials in civil engineering" volume 14 nº6 Dezembro 2002.
- [11] Krus, M.; KieBl, K. – Determination of the Moisture storage characteristics of porous capillary active materials. Fraunhofer-Institut, Holzkirchen, Alemanha, 1997.
- [12] Kunzel, Hartwig - Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. PhD Thesis. Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.
- [13] Lança, Pedro – Humidade nos edifícios. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja. Junho 2008.
- [14] Mendonça, Paulo – Estratégias para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperados. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Universidade do Minho, 2005.

- [15] Miniotate, Ruta – Hygroscopic adsorption and desorption isotherms of porous building materials. Faculdade de Engenharia Civil Kaunas, Lituânia, 2007.
- [16] PINA dos Santos, Carlos; MATIAS, Luis – Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. Coleção ICT, Série ITE 50, 2ª edição, LNEC. Lisboa, 2006
- [17] Qin, Menghao; Belarbi, Rafik; Nilsson, Lars-Olof - Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials. "Construction and building materials" volume 23 (2009) pp 967–975.
- [18] Slalina, Petr – Moisture transport in compact flat roofs. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia Civil Praga, 2009.
- [19] Tada, Shinsaku; Watanabe, Kazumasa – Dynamic determination of sorption isotherm of cement based materials. "Cement and concrete research" volume 35 (2005) pp 2271– 2277.
- [20] Wihan, Jakub – Humidity in straw bale walls and its effects on the decomposition of straw. Tese de doutoramento. University of East London School of Computing and Technology, Londres, 2007.
- [21] Zitek, Pavel; Vyhldal, Tomáš – Model base moisture sorption stabilization in historical buildings. "Building and Environment" volume 44 (2009) pp 1181-1187.
- [22] Comité Européen de Normalization (CEN)/ International Organization for Standardization (ISO) – Thermal resistance and thermal transmittance. Brussels, 1996.